

tanulmányok 130/1982

1982. MÁJ. 1. 9

MTA Számítástechnikai és Automatizálási Kutató Intézet Budapest



MAGYAR TUDOMÁNYOS AKADÉMIA
SZÁMITÁSTECHNIKAI ÉS AUTOMATIZÁLÁSI KUTATO INTÉZETE

**A LÉZER PRINTER KÉPALKOTÁSI HIBÁI
ÉS OPTIKAI KORREKCIÓJUK**

Irta:

BARABÁS MIKLÓS
TÖKÉS SZABOLCS

Tanulmányok 130/1982

A kiadásért felelős:
DR. VAMOS TIBOR

ISBN 963 311 7

ISSN 0324-2951

T A R T A L O M

BEVEZETÉS	5
Az optikai rendszer leírása	5
 1. A KORRIGÁLÓ OPTIKA NÉLKÜLI ELRENDEZÉS	8
1.1. A felhasznált elméletről	8
1.2. A korrigáló optika nélküli elrendezés geometriája és a felbontás értelmezése	9
1.3. A korrigálatlan szkennerek képalkotási hibái	12
1.3.1. Torzítás (a futási sebesség változás)	12
1.3.2. Képzőgörbület és foltméretváltozás	14
1.4. A foltméretváltozás minimalizálása az előfókuszálás optimális megválasztásával	15
1.5. A korrigálatlan szkennerekre vonatkozó numerikus eredmények összefoglalása	16
1.6. A korrigáló optika nélküli elrendezésben használható forgótükör specifikációja	19
1.6.1. A tervezés szempontjai	19
1.6.2. Méretezési példák	23
 2. A KORRIGÁLÓ OPTIKA TERVEZÉSE	29
2.1. A tervezéshez felhasznált fogalmakról	29
2.2. A paraboloid-tükör	30
2.2.1. A torzítás minimalizálása a deflekciós paraméter optimális megválasztásával	30
2.2.2. A leképezés pontszerűségének a vizsgálata	39
2.2.3. A síkbeli elrendezéstől való eltérés okozta offset torzítás	40
2.3. A gömbtükör	43
2.3.1. A minimális torzítást adó deflekciós paraméter meghatározása	43
2.3.2. A leképezés pontszerűsége; a numerikus eredmények összefoglalása	44
2.3.3. A gömbtükör offset torzítása	49

T Á B L Á Z A T O K

1. A forgótükrös szkennerek adatai ($N = 1500$)
2. A forgótükrös szkennerek adatai ($N = 3000$)
3. Katalógusból választott forgótükrök
 - 3/1. $N = 1500$, $n = 24$
 - 3/2. $N = 1500$, $n = 30$
 - 3/3. $N = 3000$, $n = 18$
 - 3/4. $N = 3000$, $n = 18$
4. A részletesen kiértékelt parabolatükrök
5. A részletesen kiértékelt gömbtükrök

Á B R Á K

1. A karaktergenerátor optikai rendszere
2. A Gauss-nyaláb geometriai jellemzői
3. A korrigálatlan szkennerek geometriája
4. A korrigálatlan szkennerek torzításai a defl. szög fv.-ében
5. A korrigálatlan szkennerek méretei és hibái a képtávolság és a felbontás függvényében
6. A forgótükör vázlata és adatai
7. A parabola-tükrös szkennerek vázlata
8. A parabolid-tükör torzításának a kiszámításához használt jelölések
9. A parabolid-tükör relatív torzítása a defl. szög fv.-ében
10. A parabolid-tükörrel elérhető maximális defl. szög a deflekciós paraméter függvényében
11. Az optimális deflekciós paraméter és a maximális deflekciós szög a normált képtávolság függvényében
12. Az offszet torzítás értelmezése
13. A parabolatükör offszet torzítása a képtávolság fv.-ében
14. A gömbtükrök relatív torzítása a defl. szög fv.-ében
15. A gömbtükrökkel elérhető maximális deflekciós szög a deflekciós paraméter függvényében
16. Az optimális deflekciós paraméter és a maximális eltérítési szög a normált képtávolság függvényében gömbtükrök esetén

A GRAFIKUS PRINTER, A PLOTTER ÉS AZ OPTIKAI JELOLVASÓ OPTIKAI RENDSZERÉVEL KAPCSOLATOS KÉRDÉSEK

BEVEZETÉS

A lézerprinter grafikus printerré illetve plotterre alakításához a már meglevő optikai rendszer teljesítményét (felbontását, képminőségét) meg kell javítani.

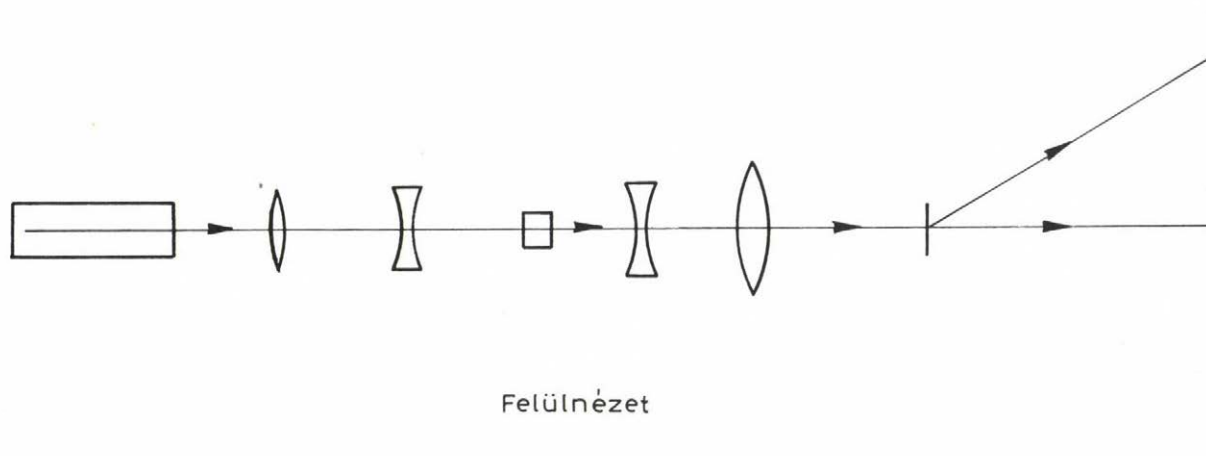
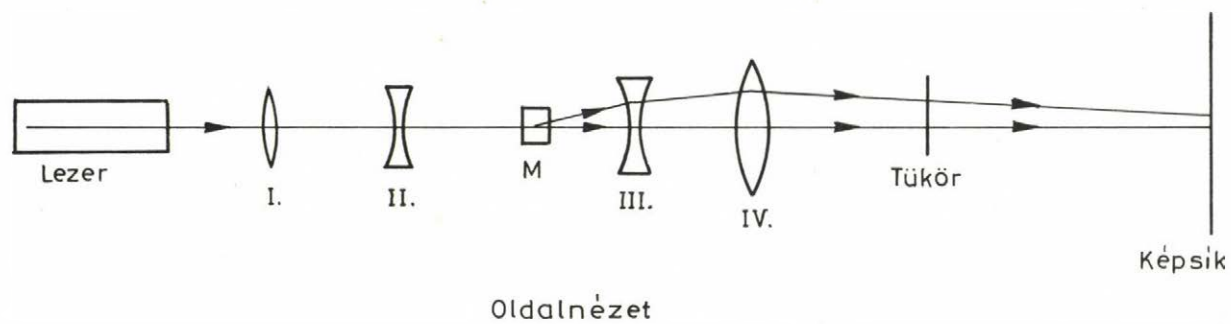
A következőkben a felbontás növelésének a határait, az elrendezés geometriai paramétereinek az optimális értékeit és a sorirányu eltérítésnél szükségszerűen fellépő képalkotási hibák korrekciójának a lehetőségeit vizsgáljuk meg.

AZ OPTIKAI RENDSZER LEÍRÁSA

A karaktergenerátor optikai rendszerének a vázlatát az 1. ábra mutatja. A lézerből kilépő nyalábot az I. és II. lencséből álló teleszkóp fókuszálja az M modulátorba. A modulátorban szétváló nyalábokat a III. lencse már a hagyományos értelemben vett (virtuális) tárgynak "látja". A III. lencse szempontjából tehát a modulátor a belépő pupilla szerepét játssza. A III. lencse által alkotott virtuális képet a IV. lencse valódi tárgynak látja, és a sorirányu eltérítést végző rezgő- vagy forgótükör utáni képsikra képezi le.

Az optikai rendszernek a IV. lencséig terjedő részében a fény lényegében a paraxiális tartományban halad, és a IV. lencsével szemben támasztandó követelmények sem túl szigorúak. Ez az "előfókuszáló" lencse jelenleg egy 3.5/135-ös fényképező objektív, amely gyakorlatilag diffrakció-limitált képet ad.

A felbontást, illetve a rezgőtükör után létrehozott kép minőségét elsősorban az a tény korlátozza, hogy a vízszintesen eltérített nyalábok fókusztpontjai a képsik helyett egy hengerpaláston mozognak. Ezért a képalkotó nyalábok legfeljebb két



1. ábra: A karaktergenerátor optikai rendszere

eltérítési szögnél lehetnek pontosan a képsikra fókuszálva. Mivel a felbontás növelése a mélységélesség csökkenésével jár, ennek a defókuszáltságnak a hatása nagy felbontás esetén igen számottevő lehet.

A vízszintes eltérítő tükör előtt alkalmazott fókuszálás miatt torzítás is fellép, ugyanis az egyenletes szögsebességgel forgatott nyalábok a képsikon az eltérítési szögtől függő sebességgel futó foltot hoznak létre.

A fentiekből megállapítható, hogy az optikai rendszer legkritikusabb - bár legegyszerűbb - része a sorirányú eltérítő. A következő pontban ezért a korrigáló optika nélküli ("post-objective") szkennerek hibáit, az elérhető felbontást és a geometriai méretek optimális megválasztásának a lehetőségét vizsgáljuk meg.

1. A KORRIGÁLÓ OPTIKA NÉLKÜLI ELRENDEZÉS

1.1 A FELHASZNÁLT ELMÉLETRŐL

A fényterjedés és a képalkotás leírásához a skalár hullám-optikát, a diffrakciót és a geometriai optikát használjuk.

A lézerből illetve a diffrakció-limitáltnak tekinthető előfókuszáló optikából kilépő nyalábot azzal a térbeli amplitúdó- és intenzitás-eloszlással jellemezzük, amit a skalár hullámegyenlet közelítő megoldása szolgáltat. Ez az intenzitáseloszlás TEM_{00} módusu nyaláb esetén

$$(1a) \quad i \sim \{\exp[-2(r/w)^2]\}/w^2,$$

TEM_{01}^* módusu nyaláb esetén pedig

$$(1b) \quad i \sim (r/w) \cdot \exp[-2(r/w)^2],$$

ahol

$$(2) \quad w(z) = w_0 \cdot \sqrt{1 + (\lambda \cdot z / \pi w_0^2)^2},$$
$$r^2 = x^2 + y^2,$$
$$\lambda = \text{hullámhossz},$$

és x, y, z abban a koordináta-rendszerben értendő, amelynek a középpontja a nyaláb maximális intenzitású pontja (fókusza), és amelynek a z -tengelye a terjedés irányába mutat. Ezeket az intenzitás-eloszlásokat jól szemlélteti a (2) egyenlet által meghatározott " $1/e^2$ -es nyalábkontur". A nyaláb geometriai tulajdonságait a

$$\vartheta = \lambda / \pi w_0 \quad \text{divergenciával,}$$

$$z_R = \pi w_0^2 / \lambda \quad \text{mélységélességgel ("Rayleigh-range")}$$

$$\text{és a } w_0 \quad \text{nyakmérettel}$$

adhatjuk meg. Ezeket a mennyiségeket a 2. ábra mutatja.

Elvi szempontból érdemes megjegyezni, hogy az (1) intenzitás-eloszlással leírt nyalábok terjedését a Fresnel-féle diffrakció ugyanolyan pontossággal írja le, mint a hullámegyenlet, a távoltéri ($z \gg z_R$) és a fókuszszikbeli ($z=0$) intenzitás-eloszlás kapcsolatát pedig a Fraunhofer-diffrakció is egzaktul adja meg.

A geometriai optika szempontjából a nyalábot a kontur aszimptotikus érintőkupja által határolt sugárnyalábnak (gömb-hullámnak) tekinthetjük.

A korrigáló optika nélküli elrendezés vizsgálatához az egzakt intenzitás-elosztást használjuk, a korrigáló optika tervezéséhez pedig a geometriai optikának és a Fraunhofer-diffrakciónak az optikai rendszerek elméletében szokásos kombinációját. Ez az utóbbi azt jelenti, hogy egy leképező vagy nyalábformáló rendszerben a tárgyponttól a kilépő pupilláig történő fényterjedést a geometriai optika alapján, a kilépő pupillától a képsikig történőt pedig a Fraunhofer-diffrakcióval írjuk le, és a két módszert a kilépő pupillában értelmezett aberráció-függvény-nyel kapcsoljuk össze.

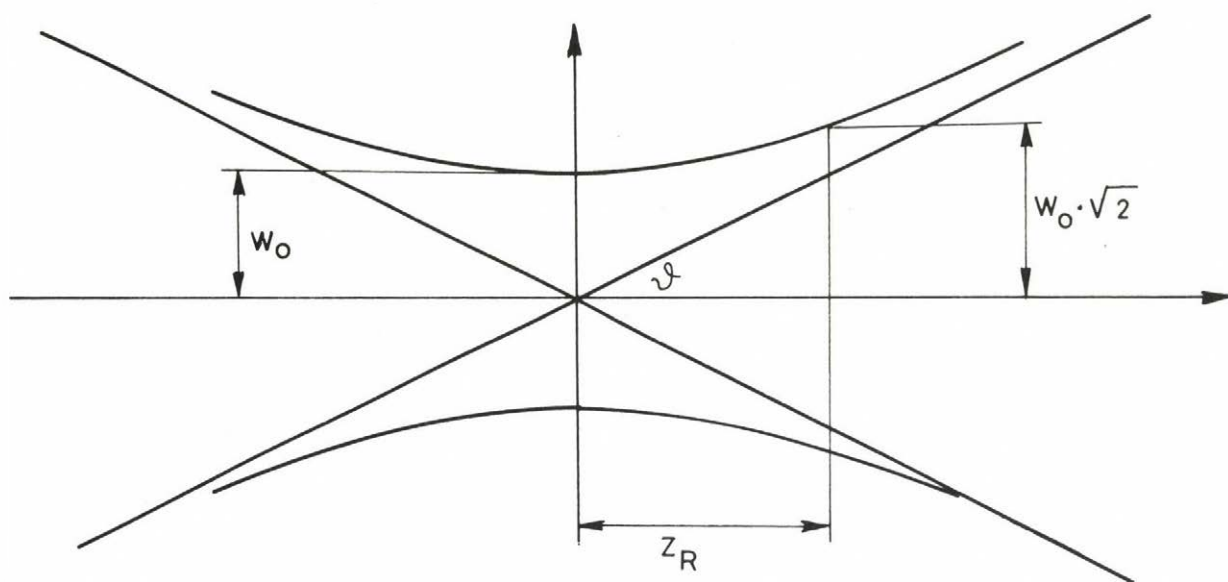
1.2 A KORRIGÁLÓ OPTIKA NÉLKÜLI ELRENDEZÉS GEOMETRIÁJA ÉS A FELBONTÁS ÉRTELMEZÉSE

A korrigáló optika nélküli szkennert (sikbeli) jellemzőit a 3. ábra mutatja.

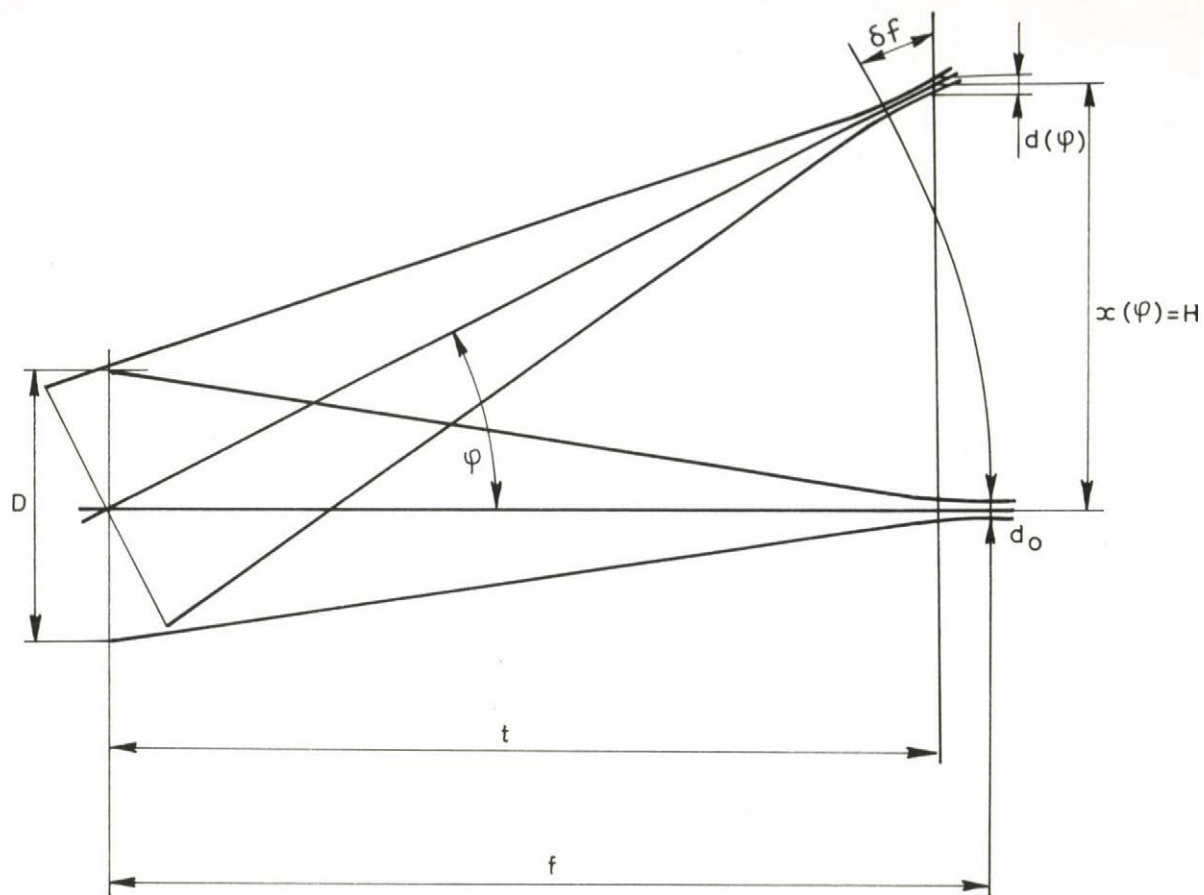
Az eltérítés a nyalábnak a deflekciós centrum (0) körüli forgatását jelenti, ezért a fókuszpont f -sugaru körön mozog.

A képfoltokat a nyalábkontur metszi ki a képsikből. Felbontásnak a képsik teljes ($2H$) szélességében elhelyezhető, egymással éppen érintkező képfoltok számát nevezzük. A következő jelöléseket használjuk:

t	a deflekciós ponttól mért képtávolság
f	a deflekciós ponttól mért fókusz-távolság
d_0	a képsikon mért minimális foltméret



2. ábra: A Gauus-nyaláb geometriai jellemzői



3. ábra: A korrigálatlan szkenner geometriája

$d(\varphi)$	a képsíkon mért, az eltérítési szögtől függő folt- átmérő ($d=2w$)
D	a deflekciós pontban mért nyalábátmérő
ϑ	nyalábdivergencia
φ	eltérítési szög
Φ	maximális eltérítési szög
H	a teljes képszélesség (= sorhosszuság) fele
N	felbontás

1.3 A KORRIGÁLATLAN SZKENNER KÉPALKOTÁSI HIBÁI

1.3.1 Torzítás (a futási sebesség változása)

A φ szöggel eltérített nyaláb középpontja az

$$(3) \quad x(\varphi) = t \cdot \operatorname{tg} \varphi$$

koordinátájú pontban metszi a képsíkot, és

$$(4) \quad v(\varphi) = dx/dt = t \cdot \cos^{-2} \varphi \cdot \dot{\varphi}$$

sebességgel mozog, ahol $\dot{\varphi}$ a nyaláb szögsebessége.

Az abszolút torzítást a valódi képpont és az ideális képpont távolságával, a relatív torzítást pedig az abszolút torzítás és az $x(\varphi)$ "képmagasság" (pozíció) hányadosával mérjük.

Az abszolút torzítás:

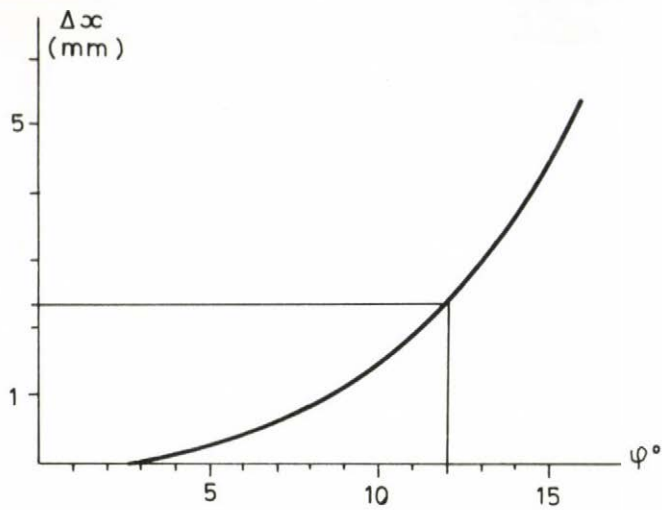
$$(5) \quad \Delta x = t \cdot (\operatorname{tg} \varphi - \varphi)$$

A relatív torzítás:

$$(6) \quad \delta x = (\operatorname{tg} \varphi / \varphi) - 1$$

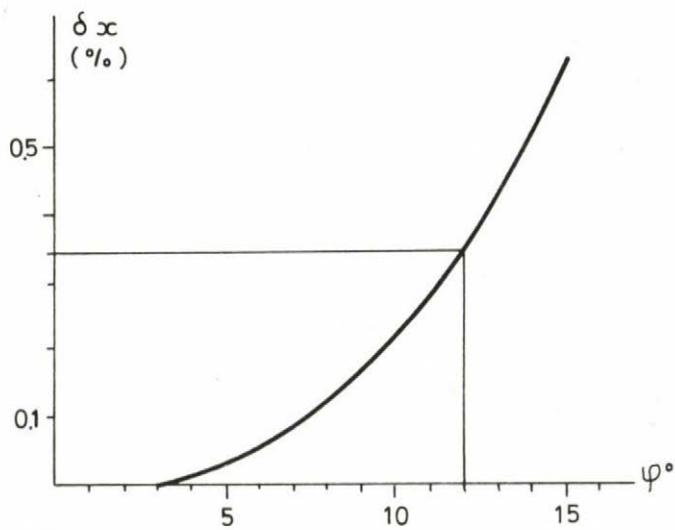
A futási sebesség relatív változása:

$$(7) \quad \delta v = \cos^{-2} \varphi - 1$$



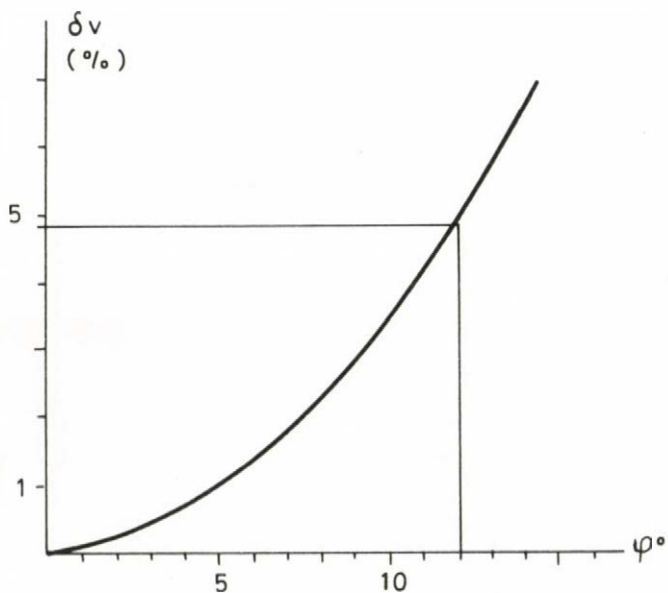
4/1. ábra:

A korrigálatlan szkennertorzitása $t = 700$ mm képtávolság esetén



4/2. ábra:

A korrigálatlan szkennertorzitása relatív torzitása



4/3. ábra:

A képfolt futási sebességének relatív változása

Mindhárom torzítás az eltérítési szöggel nő, ezért a szkennertorzítását egyértelműen jellemzik a maximális eltérítési szöghöz, $\Phi = \arctg(H/t)$ -hez tartozó értékeik.

A torzításoknak az eltérítési szögtől való függését a 4/1., 4/2., 4/3. ábrák mutatják. Az abszolút torzítást bemutató görbe a $t=700$ mm képtávolsághoz tartozik, a másik két görbe minden képtávolság esetére ugyanugy fest.

1.3.2 Képmező-görbület és foltméretváltozás

Az eltérített nyalábok fókuszpontjai a deflekció előtti fókuszálás miatt körvonalon mozognak, ezért az elrendezés egy olyan klasszikus optikai rendszernek felel meg, amelynek $1/f$ nagyságu negatív képmező-görbülete van. Emiatt az egyes nyalábok különböző eltérítési szögek esetén különböző nagyságu foltokat metszenek ki a képsíkból. A képfolt méretének az eltérítési szögtől való függését a különböző φ -khez tartozó nyalábkontúrok és a képsík metszésvonalának a meghatározásával számolhatjuk ki.

A foltátmérő a szkennert geometriai paramétereinek és az eltérítési szögnek a függvényében a következőnek adódik:

$$(8) \quad d(\varphi) = \frac{2}{\sin \varphi} \cdot \left\{ \left(\frac{\delta f \cdot \operatorname{ctg}^2 \varphi}{\operatorname{ctg}^2 \varphi - \operatorname{tg}^2 \vartheta} \right)^2 - \frac{(\delta f \cdot \operatorname{ctg} \varphi)^2 - w_0^2}{\operatorname{ctg}^2 \varphi - \operatorname{tg}^2 \vartheta} \right\}^{1/2},$$

ahol

$\delta f = f - t / \cos \varphi$ a defókuszáltság, vagyis a fókuszpont és a képpont távolsága

Az adott geometriára jellemző relatív foltméretváltozást a

$$(9) \quad \delta d = (d_{\max} - d_{\min}) / d_{\min}$$

mennyiséggel jellemezzük, ahol d_{\max} illetve d_{\min} a $d(\varphi)$ függvénynek a $0 \leq \varphi \leq \Phi$ intervallumon felvett maximumát illetve minimumát jelenti.

1.4 A FOLTMÉRETVÁLTOZÁS MINIMALIZÁLÁSA AZ ELŐFOKUSZÁLÁS OPTIMÁLIS MEGVÁLASZTÁSÁVAL

Az előző pontban láttuk, hogy a foltméret relatív változása a maximális eltérítési szögön és a nyaláb paraméterein kívül a fókusz távolságtól és a képtávolságtól is függ. Most meghatározzuk azt a fókusz távolságot (előfókuszálást), amely rögzített képtávolság, sorhosszuság, felbontás és hullámhossz esetén minimális foltméretváltozást ad.

A számítást a geometriai optikai foltátmérő minimalizálásával végezzük. Ez azt jelenti, hogy a nyaláb érintőkupja által a képsíkból kimetszett folt átmérőjét írjuk fel az eltérítési szög és a többi paraméter függvényeként. Ezzel kapunk egy $d^{\text{geom}}(\varphi; f, t, \vartheta)$ kifejezést, és a különböző f -ekhez tartozó $d^{\text{geom}}(\varphi)$ függvények közül kiválasztjuk azt, amelyiknek a $0 \leq \varphi \leq \Phi$ intervallumon minimális a $\Delta d^{\text{geom}} = \max\{d^{\text{geom}}(\varphi)\} - \min\{d^{\text{geom}}(\varphi)\}$ -vel értelmezett abszolút változása. A valódi foltméret-ingadozást ezután a (8), (9) formulákból határozzuk meg.

Az előző pont jelöléseit használva a geometriai foltátmérő

$$d^{\text{geom}}(\varphi; f, t, \vartheta) = |f - t / \cos \varphi| \cdot \sin \vartheta \cdot \left(\frac{1}{\cos(\varphi - \vartheta)} + \frac{1}{\cos(\varphi + \vartheta)} \right)$$

Bármilyen (f, t, ϑ) paramétereket is veszünk, a $d^{\text{geom}}(\varphi)$ függvény minimuma nulla lesz, maximumát pedig a $[0, \Phi]$ intervallum kezdő- vagy végpontjában veszi fel. Ezen kívül észrevehetjük, hogy a függvény Φ pontban felvett értéke a 0 pontban felvett értéknek szigorúan monoton függvénye. Ezért annak a $d^{\text{geom}}(\varphi)$ függvénynek az ingadozása lesz a minimális, amelyre teljesül, hogy

$$d^{\text{geom}}(\Phi) = d^{\text{geom}}(0).$$

Ezt az egyenletet f -re megoldva az optimális fókusz távolságra azt kapjuk, hogy

$$(10) \quad f^{\text{opt}} = \frac{A(\vartheta, \Phi) / \cos \Phi + 2 \cdot t \cdot \operatorname{tg} \vartheta}{A(\vartheta, \Phi) + 2 \cdot t \cdot \operatorname{tg} \vartheta} t \approx \frac{1 / \cos^2 \varphi + 1}{1 / \cos \varphi + 1} t ,$$

ahol

$$A(\vartheta, \Phi) = \sin \vartheta \cdot (1 / \cos(\Phi - \vartheta) + 1 / \cos(\Phi + \vartheta)) .$$

Az optimális előfókuszáláshoz tartozó relatív foltméretváltozásra

$$(11) \quad \delta d = \frac{f^{\text{opt}}}{t} \left\{ 1 + \left[\frac{\lambda \cdot (f^{\text{opt}} - t)}{2 \pi w_o} \right]^2 \right\}^{1/2} - 1$$

adódik.

1.5 A KORRIGÁLATLAN SZKENNERRE VONATKOZÓ NUMERIKUS EREDMÉNYEK ÖSSZEFOGLALÁSA

A korrigáló optika nélküli elrendezés geometriai adatainak és képkalkotási hibáinak a számszerű értékei közötti összefüggéseket az 5/1. - 5/6. ábrák illusztrálják.

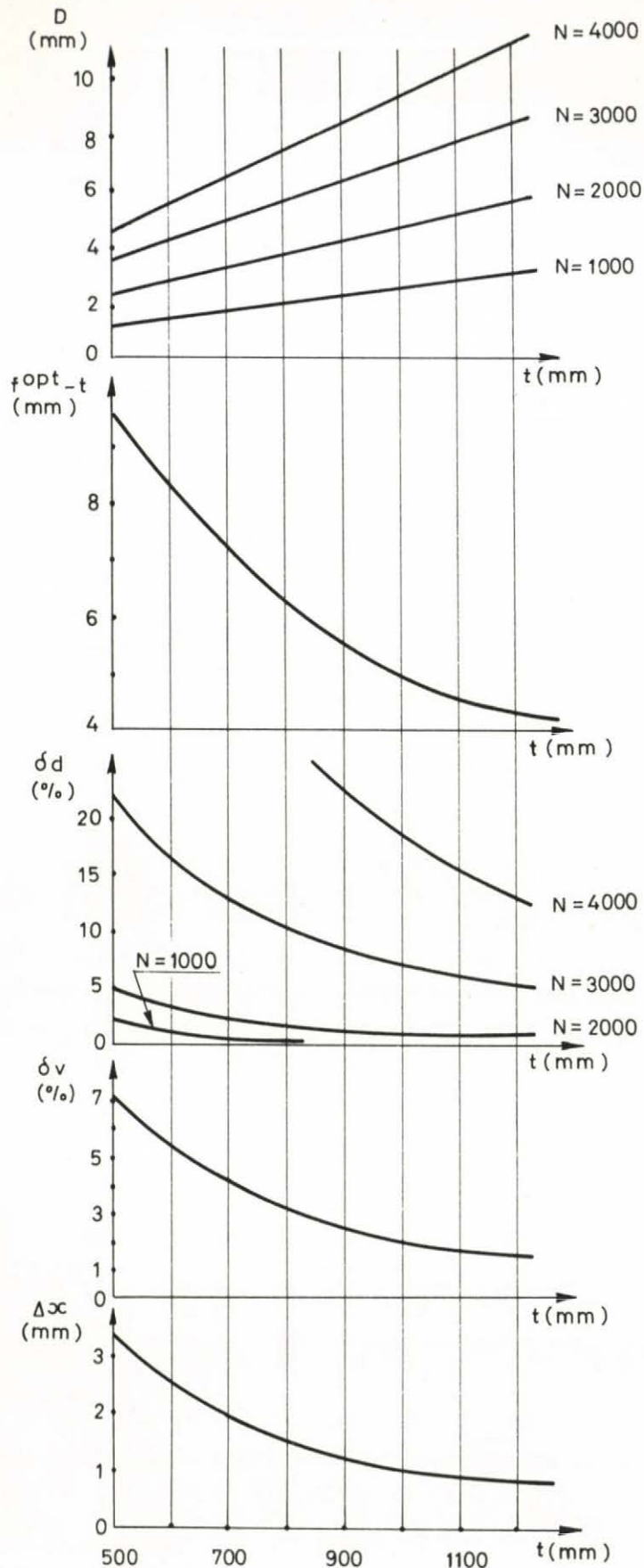
Az 5/1. ábrán a deflekciós pontban mért nyalábátmérőnek a képtávolságtól való függése látható különböző felbontások esetén.

Az 5/2. ábra az optimális fókusz távolság és a képtávolság különbségét mutatja a képtávolság függvényében. Mivel az adott sorhosszuság mellett néhányszor 10^3 pont felbontás esetén a nyalábdivergencia két nagyságrenddel kisebb, mint az eltérési szög, az általunk vizsgált esetekben az f^{opt} -t különbség gyakorlatilag független a felbontástól.

Az 5/3. görbék a relatív foltméretváltozásnak a képtávolságtól való függését mutatják négy különböző felbontás esetére.

Az 5/4. görbe a futási sebesség relatív változását, az 5/5. ábra pedig a pozicionálási hiba nagyságát mutatja a képtávolság függvényében. (Ezek a görbék természetesen függetlenek a felbontástól.)

Az 5/6. ábra ugyanazokat az adatokat tartalmazza, mint az 5/3., de itt néhány rögzített képtávolság mellett a felbontás



5/1. ábra:

A deflektációs pontban mért nyalábátmérő függése a képtávolságtól

5/2. ábra:

Az optimális előfókuszálás és a képtávolság különbsége a képtávolság függvényében

5/3. ábra:

A relatív foltméretváltozás függése a képtávolságtól

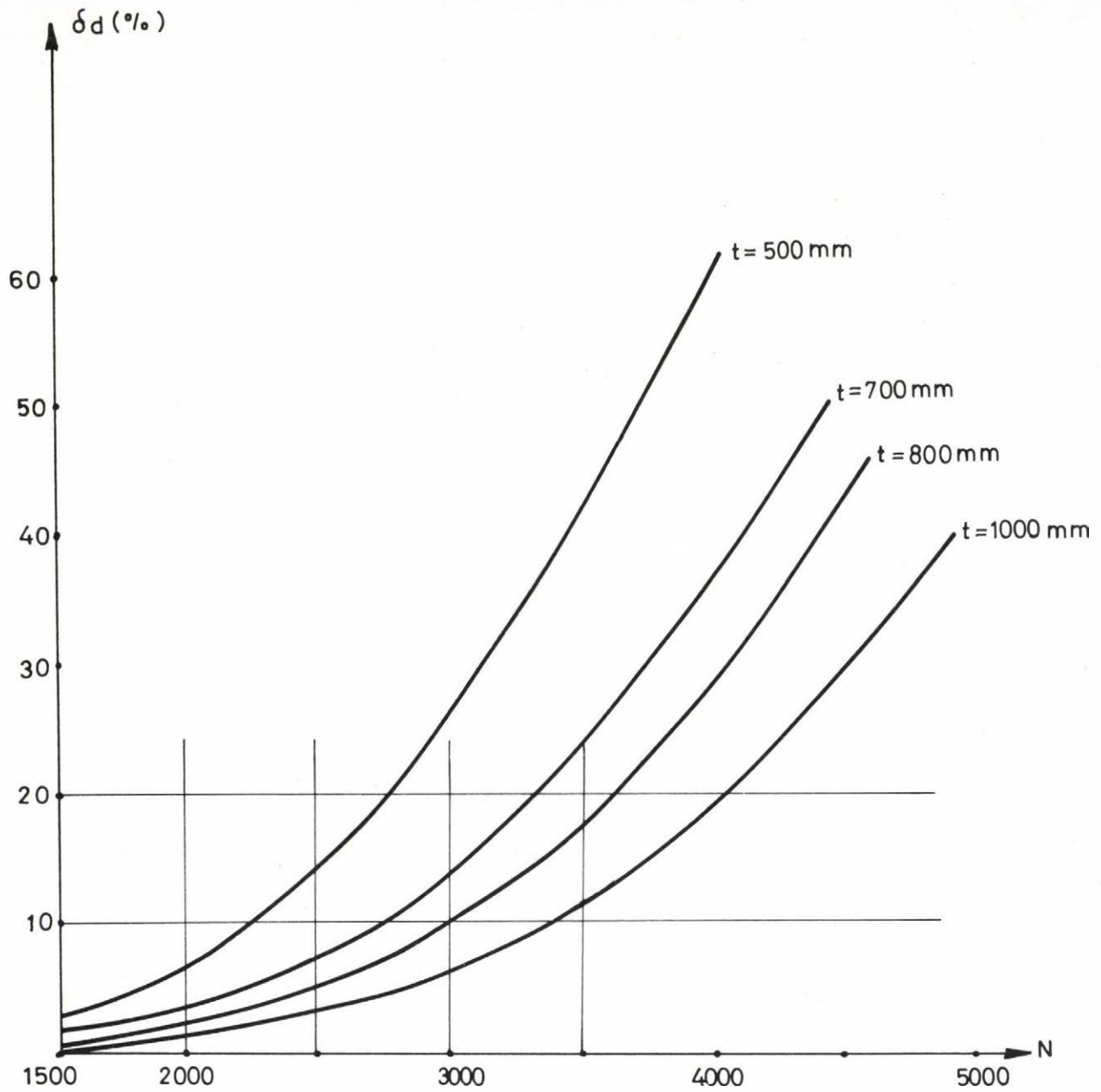
5/4. ábra:

A relatív sebességváltozás a képtávolság függvényében

5/5. ábra:

A maximális pozicionálási hiba függése a képtávolságtól

A sorhosszúság mindenütt 280 mm,
a hullámhossz $\lambda = 488$ nm



5/6. ábra: A relatív foltméretváltozás függése a felbontástól

függvényében rajzoltuk fel a foltméretváltozást.

Az összes görbe

488 nm-es hullámhossz és

280 mm-es teljes sorhosszuság

mellett értendő!

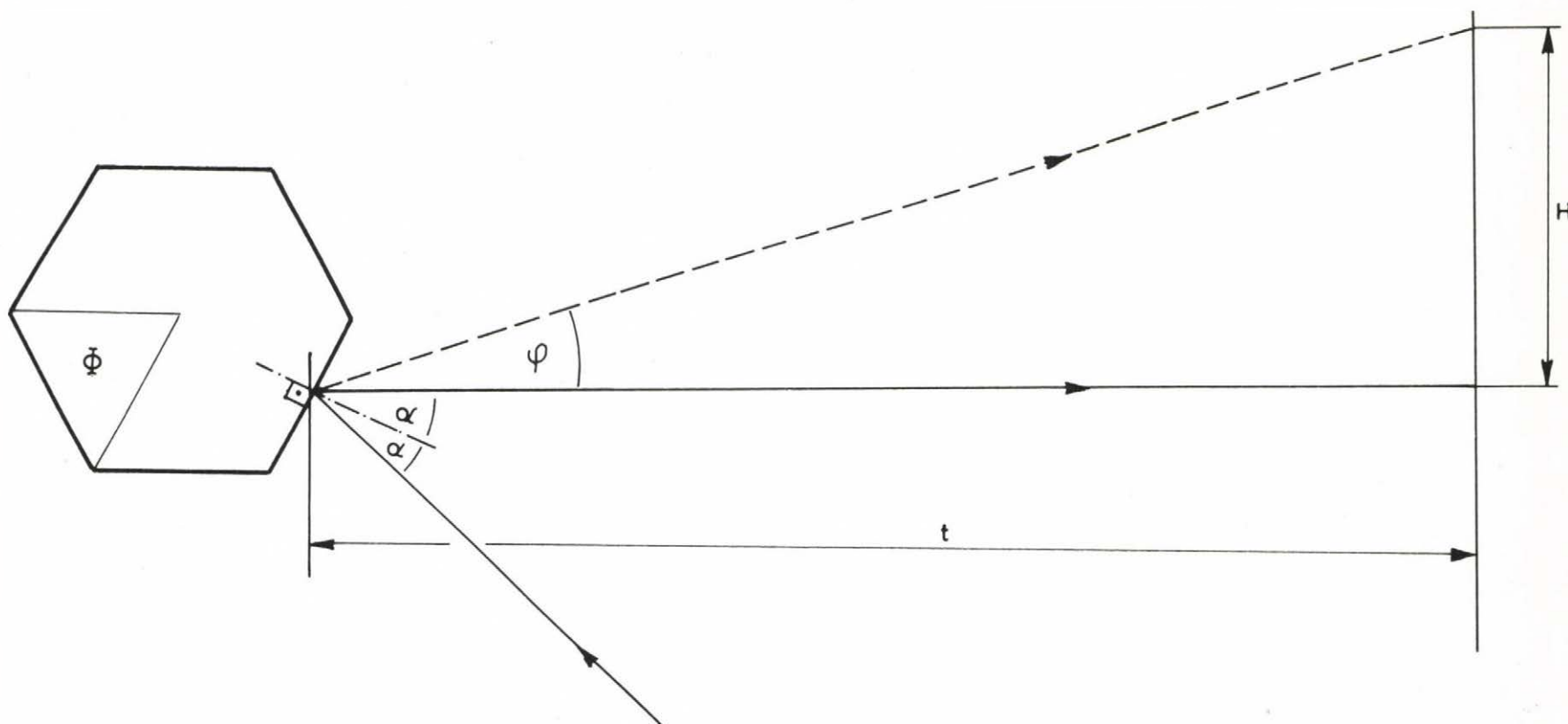
1.6 A KORRIGÁLÓ OPTIKA NÉLKÜLI ELRENDEZÉSBEN HASZNÁLHATO FORGÓTÜKÖR SPECIFIKÁCIÓJA

1.6.1 A tervezés szempontjai

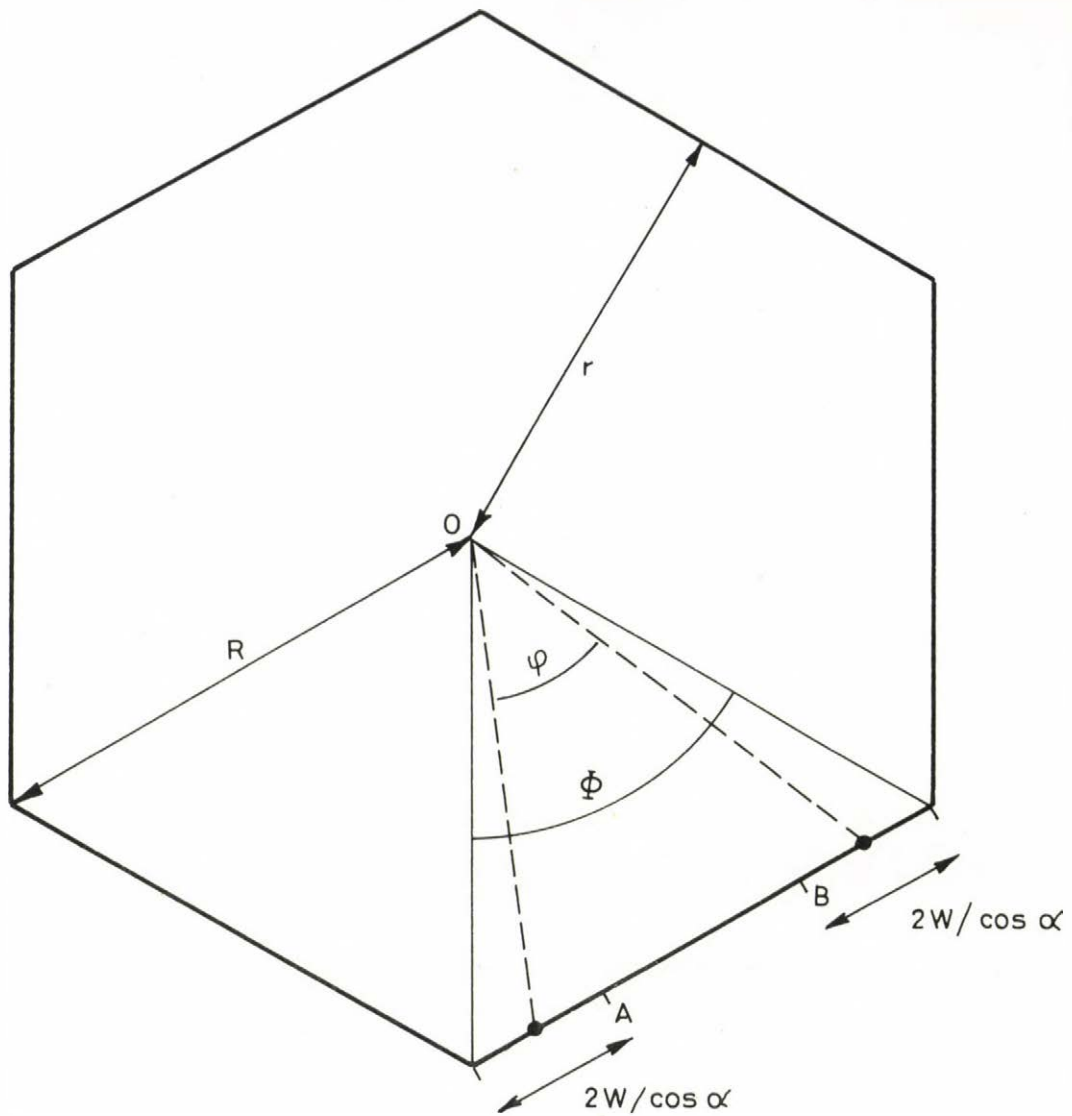
A forgótükörös szkennervázlatát a 6/1., 6/2. ábrák mutatják. A tükör "működése" azt jelenti, hogy az állandó helyzetű beeső nyalábot a nyaláb alatt elforduló tükörlapka - akárcsak a rezgőtükör esetében - a tükör elfordulási szögének a kétszeresével eltéríti. Amikor a sokszögtükör valamelyik éle a nyaláb széléhez ér, akkor az eltérítés felhasználható szakaszának vége van, ugyanis addig, amíg az él a nyaláb alatt mozog, két visszavert nyaláb keletkezik. Amikor a tükör éle kifut a nyaláb alól, akkor új eltérítési periódus kezdődik, amelynek az elején a visszavert nyaláb ismét a sor elejéről indul. Az a "holtidő", amely az élnek a nyaláb alatti elmozdulásához kell, a rezgőtükör visszafutási idejének felel meg.

A tükör tervezéséhez az alábbi jelöléseket használjuk:

t	képtávolság
H	fél sorhossz
φ	maximális eltérítési szög
Φ	a poligon középponti szöge
α	a nyaláb maximális beesési szöge
W	nyalábsugár a deflekciós pontban
w_0	nyalábsugár a képsikon
N	felbontás
λ	hullámhossz
κ	a nyaláb (diffrakciós) alakfaktora



6+1. ábra: A forgótükör vázlata



6/2. ábra: A forgótükör adatai

r a poligon belső sugara

n a poligon oldalainak a száma

A tükör geometriai specifikációjához a következő négy szempontot kell figyelembe venni:

a/ A tükör oldalainak a számát a megengedett visszafutási idő és az eltérítési szög határozza meg:

Adott H és t esetén φ is rögzített, mert $\varphi = \arctg(H/t)$. Az ábrák szerint a középponti szög nem lehet kisebb az eltérítési szögnél, tehát

$$n \leq 360^\circ / \varphi.$$

A 6/2. ábráról az is látható, hogy a visszafutási időnek és a periódusidőnek az aránya a középponti szög kihasználatlan részének és a teljes középponti szögnek az arányával egyenlő, azaz

$$T_v/T = (\Phi - \varphi) / \Phi = 1 - n\varphi / 360^\circ.$$

Ezért, ha a visszafutási idő legfeljebb k -ad része lehet a periódusidőnek, akkor a tükör oldalszámára a

$$n \geq (1-k) \cdot 360^\circ / \varphi$$

megszorítás adódik.

b/ A tükör belső sugara a tükörnél mért nyalábsugártól, a maximális beesési szögtől, az eltérítési szögtől és a középponti szögtől függ:

Az ábra szerint a nyalábnak nemcsak ráfértie kell a tükörre, hanem mindaddig teljes egészében rajta is kell maradnia, amíg az a szükséges φ szöggel el nem fordul. Ez azt jelenti, hogy az élhez legközelebbi nyaláb középpontja nem lehet távolabb az éltől, mint a φ szöget kijelölő AOB háromszög A ill. B csúcsa, vagyis

$$W/\cos\alpha \leq r \cdot (\tg\frac{\Phi}{2} - \tg\frac{\varphi}{2}).$$

Ezért a tükör belső sugarának a minimális méretét

$$r \geq \frac{W/\cos\alpha}{\operatorname{tg}(\Phi/2) - \operatorname{tg}(\varphi/2)}$$

adja meg.

c/ A tükör oldalainak a szögbeli türesét a megengedett legnagyobb pozicionálási hiba határozza meg:

Ha a tükör pontatlanságából eredő pozicionálási hiba legfeljebb a foltméret $1/m$ -ed része lehet, akkor az egyes tükörlapok normálisai legfeljebb

$$\delta\varphi = 2w_0/mt$$

szöget zárhatnak be az ideális helyzetükkel.

d/ A tükörnél mért nyalábsugarat a felbontás, a sorhosszúság és a képtávolság adja meg:

Egy raszterpont sugara

$$w_0 = H/N.$$

Az ennek megfelelő nyalábdivergencia

$$\vartheta = \kappa\lambda / \pi w_0.$$

Ezzel a tükörnél mért nyalábsugár

$$W = t\vartheta.$$

1.6.2 Méretezési példák

Az előbbi összefüggések felhasználásával meghatározzuk néhány, a grafikus printerbe való forgótükör adatait.

Kiindulási adataink:

Hullámhossz	$\lambda=488$ nm		
Sorhosszuság	$2H=280$ mm		
Felbontás	$N=1500$	és	$N=3000$
Foltátmérő	$d_o=187$ μm	és	$d_o=93$ μm
Nyalábdivergencia	$\vartheta=1.66$	és	3.33 mRad
Maximális visszafutási idő	$T_v/T \leq 30\%$		
Maximális függőleges pozicionálási hiba	$\Delta x \leq 1/3$ raszter		
Maximális beesési szög	$\alpha \leq 22.5^\circ$		
Képtávolság	700 mm ... 900 mm		

Az 1. és 2. táblázat az elrendezés geometriai jellemzői mellett a tükör paramétereire adódó határokat és a kiválasztott oldalszám esetén érvényes minimális belső sugarat és visszafutási időt mutatják.

A 3/1. - 3/4. táblázatok a LINCOLN LASER COMPANY katalógusából választott tükrök adatait tartalmazzák.

1. táblázat

A FORGOTŰKRÖS SZKENNEREK
ADATAI

$\lambda=488 \text{ nm}$, $2H=280 \text{ mm}$, $\alpha \leq 22.5^\circ$
 $N=1500$, $d_o=187 \text{ }\mu\text{m}$, $\vartheta=1.66 \text{ mRad}=0.095^\circ$

t	700 mm	750 mm	800 mm	850 mm	900 mm
φ	11.31°	10.57°	9.93°	9.35°	8.84°
f^{opt}	707 mm	756.5 mm	804.4 mm	855.5 mm	905.4 mm
δd	1.8%	1.6%	1.4%	1.2%	1.1%
δv	4%	3.5%	3.1%	2.7%	2.4%
D	2.4 mm	2.5 mm	2.7 mm	2.8 mm	3.0 mm
$\delta \varphi$	18"	17"	16"	15"	14"
n_{max}	31	34	36	38	40
n_{min}	23	24	26	26	29
n	24	24	24	24	24
r_{min}	39 mm	34.8 mm	32.3 mm	30.7 mm	29.8 mm
T_v/T	24.6%	29.5%	32.3%	37.6%	41.1%
n	30	30	30	30	30
r_{min}	209 mm	108 mm	79.3 mm	65.7 mm	58.3 mm
T_v/T	5.7%	11.9%	17.3%	22.1%	26.3%

2. táblázat

A FORGOTÜKRÖS SZKENNEREK ADATAI

$\lambda = 488 \text{ nm},$ $2H = 280 \text{ mm},$ $\alpha \leq 22,5^\circ$
 $N = 3000,$ $d_0 = 93.3 \text{ } \mu\text{m},$ $\vartheta = 3.3 \text{ mRad} = 0.19^\circ$

t	700 mm	750 mm	800 mm	850 mm	900 mm
φ	11.31°	10.57°	9.93°	9.35°	8.84°
f^{opt}	707 mm	756.5 mm	804.4 mm	855.8 mm	905.4 mm
δd	12.9%	11.3%	10%	8.9%	7.9%
δv	4%	3.5%	3.1%	2.7%	2.4%
D	4.7 mm	5.0 mm	5.3 mm	5.7 mm	6.0 mm
$\delta \varphi$	9"	8.5"	8"	7.5"	7"
n_{max}	31	34	36	38	40
n_{min}	23	24	26	26	29
n	18	18	18	24	24
r_{min}	32.6 mm	32.3 mm	32.2 mm	61.4 mm	59.7 mm
T_v/T	43.5%	47.1%	50.4%	37.6%	41.1%
n	24	24	24	30	30
r_{min}	78 mm	70 mm	65 mm	131 mm	117 mm
T_v/T	24.6%	29.5%	33.8%	22.1%	26.3%

3. táblázat

A "LINCOLN LASER COMPANY" KATALOGUSÁBOL KIVÁLASZTOTT
FORGOTŰKRÖK ÉS A VELÜK ÉPITHETŐ SZKENNEREK ADATAI

N=1500-as felbontáshoz:

1/	Part Number	P0-24-418-055
	Grade	AA
	n	24
	r	53.162 mm
	h	14.072 mm (magassag)
	t	700 ... 900 mm
	δd	1.8 ... 1.1 %
	δv	4% ... 2.4 %
	T_v/T	24.6% ... 41.1 %

2/	Part Number	P0-30-596-100
	Grade	AA
	n	30
	r	75.79 mm
	h	25.4 mm
	t	850 ... 900 mm
	δd	1.2 ... 1.1%
	δv	4% ... 3%
	T_v/T	22.1% ... 26.3%

3. táblázat

N%3000-es felbontashoz:

3/	Part Number	P0-18-227-037
	Grade	AA
	n	18
	r	35.281 mm
	h	9.525 mm
	t	700 ... 800 mm
	δd	13% ... 10%
	δv	4% ... 3%
	T_v/T	43.5% ... 50.4%
4/	Part Number	P0-18-575-062
	Grade	AA
	n	18
	r	53.162 mm
	h	14,071 mm
	t	700 ... 800 mm
	δd	13% ... 10%
	δv	4% ... 3%
	T_v/T	43.5% ... 50.4%

2. A KORRIGÁLÓ OPTIKA TERVEZÉSE

A korrekció nélküli elrendezésre vonatkozó eredményekből megállapíthatjuk, hogy 488 nm-es kék fény használatával 70-100 cm-es képtávolságnál kb. 2500-3000 pont felbontás érhető el 10%-nál kisebb foltméretváltozással.

Ugyanakkor a futási sebesség 2-4%-kal változik, és a pozicionálási hiba 1.8-0.9 mm, vagyis a foltméret 16-11-szerese.

Ha változatlan foltméret-ingadozás mellett akarjuk növelni a felbontást, vagy ha optikai úton kell csökkenteni a torzitást, akkor az eltérítő tükör és a képsík között valamilyen korrigáló optikát kell elhelyezni. A továbbiakban a korrekció két egyszerű megoldását vizsgáljuk meg.

2.1 A TERVEZÉSHEZ FELHASZNÁLT FOGALMAKROL

A korrigáló optika tervezéséhez a geometriai optika szokásos módszereit használjuk.

Ez azt jelenti, hogy az előfókuszáló optika által létrehozott és a forgótükör által eltérített nyalábok fókuszpontjait tárgynak, az eltérítő tükröt pedig a keresett optika belépő pupillájának tekintjük. Egyelőre a kép keletkezését is a geometriai optika szerint képzeljük el, tehát a képfoltokat a geometriai "spot-diagramm" átmérőjével jellemezzük. Eszerint a leírás szerint egy optika akkor alkot jó minőségű képet, ha a geometriai foltátmérő sokkal kisebb az ideális, diffrakció-limitált folténál.

Ha ez a feltétel nem teljesül, akkor a rendszer teljesítményéről csak a hullámoptikai leírás ad megbízható képet. Ekkor a rendszer (pontosabban a kérdéses nyaláb) moduláció-átviteli függvényét kell meghatározni, és annak a felhasznált térfrekvenciákon felvett értékének az ismeretében dönthető el, hogy az elrendezés megfelel-e a céljának.

2.2 A PARABOLOID-TÜKÖR

A szkennelés hibáinak a korrekciójára szemléletes meggondolások alapján kínálkozik a paraboloid-tükör. Az elrendezés vázlatát a 7. ábra mutatja. Az előfókuszáló optikából érkező nyaláb a paraboloid-tükör alatt elhaladva ér az eltérítő tükörhöz, és azon visszaverődve jut a paraboloidra. Innen visszaverődve az eltérítő tükör fölött halad el, és így kerül a képsíkra. (Ha a tükörnek csak az egyik felét használjuk ki, akkor természetesen az eltérítési sík "szétnyitása" nélkül is megvalósítható az elrendezés.)

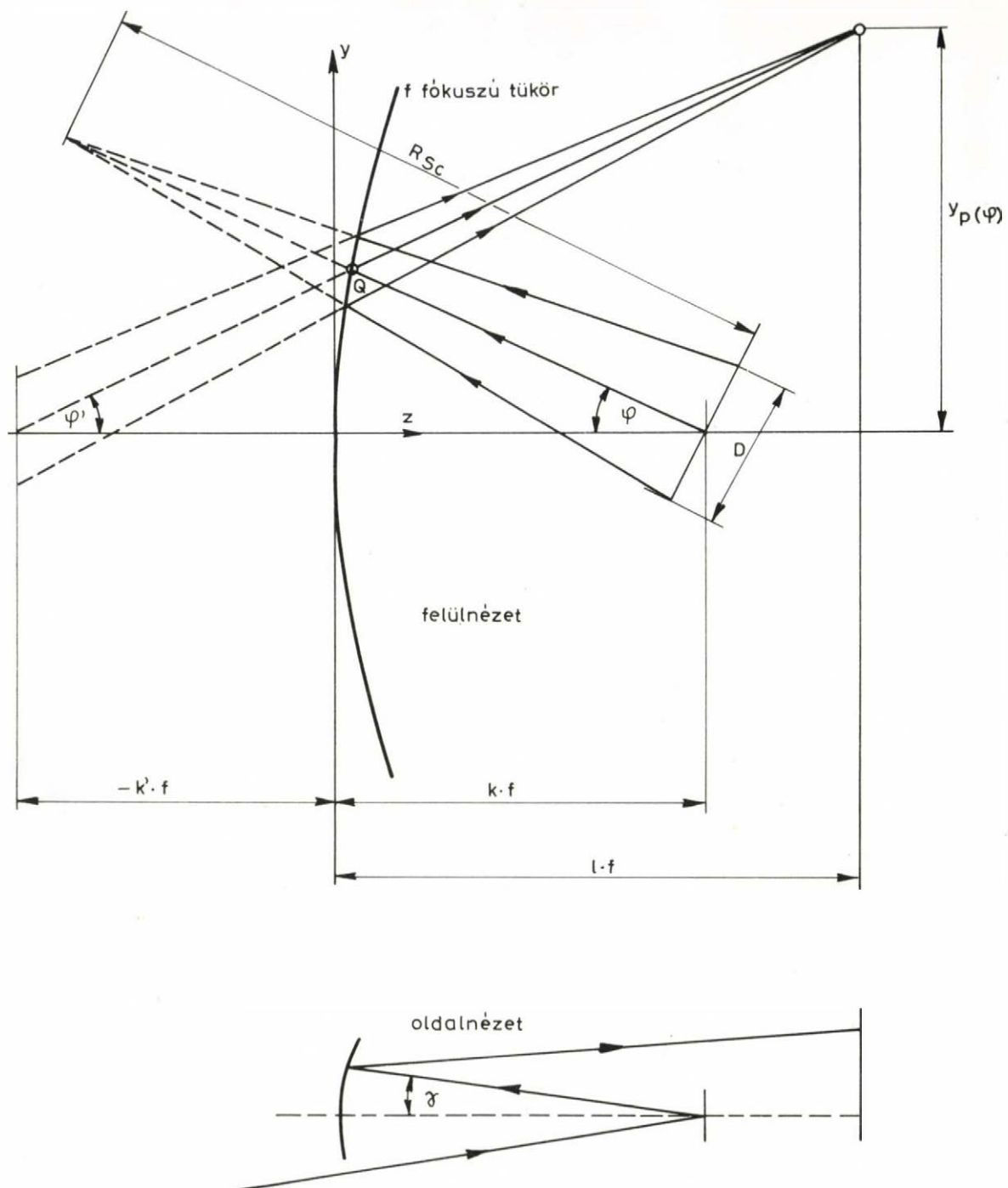
A rendszert először síkban vizsgáljuk, tehát a γ "offset szöget" nullának vesszük, és csak ezután értékeljük ki a síkból való kilépés miatt létrejövő hibákat. A síkbeli, paraboloid-tükrös szkennelssel kapcsolatban az alábbi jelöléseket használjuk:

f	a tükör fókusz távolsága
$l \cdot f$	képtávolság ("l" a normált képtávolság)
$k \cdot f$	a deflekciós centrum távolsága a tükrötől ("k" a deflekciós paraméter)
φ	eltérítési szög
R_{Sc}	a deflekciós ponttól mért előfókuszálás
d_o	a diffrakció-limitált képfolt átmérője
D	nyalábátmérő a deflekciós pontban
$y_p(\varphi)$	a képfolt pozíciója ("magassága")

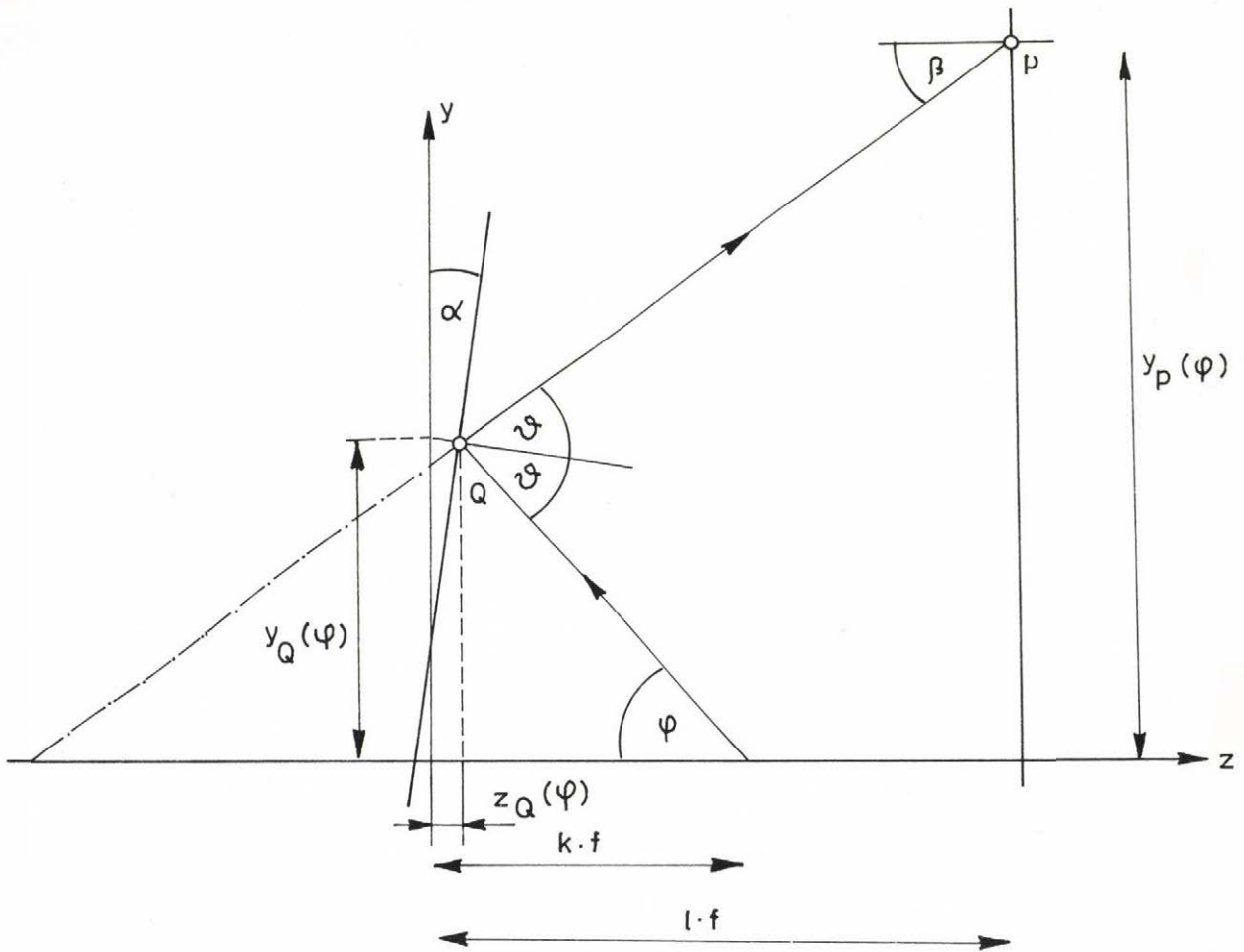
2.2.1 A torzítás minimalizálása a deflekciós paraméter optimális megválasztásával

Először belátjuk, hogy alkalmasan választott deflekciós paraméter esetén a paraboloid-tükör gyakorlatilag megszünteti a pozicionálási hibát.

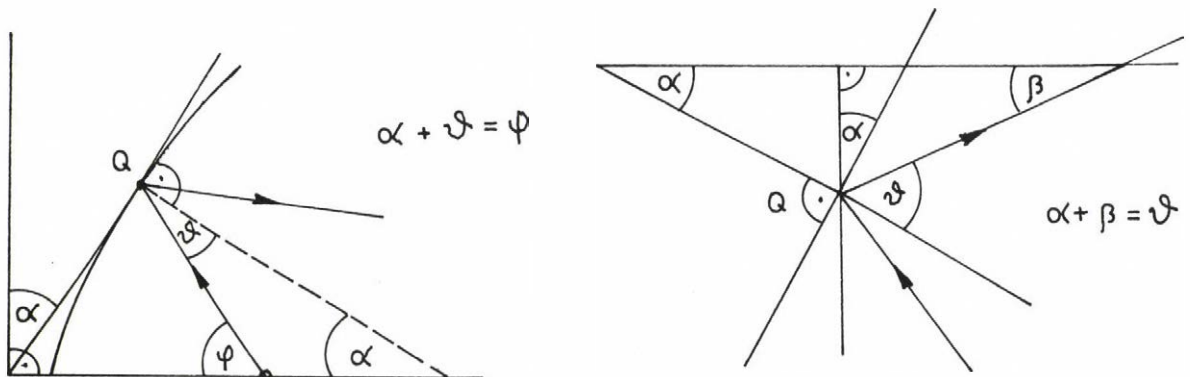
Nagyon kis eltérítési szögek esetén a képpont $y_p(\varphi)$ magassága nyilván arányos az eltérítési szöggel. Az arányossági tényező a Gauss-féle optika szerint, a 8. ábra jelöléseivel a kö-



7. ábra: A parabolid-tükrös szkennervázlata



8. ábra: A parabolid-tükör /illetve gömbtükör/ torzításának a kiszámításához használt jelölések



vetkezőképpen kapható meg:

$$(1) \quad \left. \begin{aligned} k' &= \left(1 - \frac{1}{k}\right)^{-1} \\ k \cdot \varphi &= -k' \cdot \varphi' \end{aligned} \right\} \rightarrow \varphi' = (1-k) \cdot \varphi$$

$$y_P = f \cdot (\ell - k') \cdot \varphi' \quad \left. \begin{aligned} y_P^{id} &= f \cdot [\ell(1-k) + k] \cdot \varphi \end{aligned} \right\}$$

Véges nagyságu eltérítési szögekre a fősugár pontos "átvezetése" kell elvégezni.

Ehhez a parabola

$$z_Q = y_Q^2 / 4f$$

és a fősugár

$$z_Q = -y_Q \cdot \operatorname{ctg} \varphi + kf$$

egyenletének a közös megoldásaként meghatározzuk a Q pont koordinátáit. Ezután felhasználjuk, hogy a 8. ábrán látható α szög a parabola érintőjének az y-tengellyel bezárt szöge, és így

$$\operatorname{tg} \alpha = dz_Q / dy_Q = y_Q / 2f.$$

α ismeretében a

$$\vartheta + \alpha = \varphi$$

$$\beta + \alpha = \vartheta$$

összefüggésekből β is kiszámítható, és ezzel a P pont magassága

$$y_P(\varphi) = y_Q + (\ell f - z_Q) \operatorname{tg} \beta.$$

A számítás szerint adott f , ℓ , k , esetén y_P a következőképpen függ φ -től:

$$\begin{aligned}
 \alpha(\varphi) &= \arctg \{ \sqrt{k + \operatorname{ctg}^2 \varphi - \operatorname{ctg} \varphi} \} \\
 \beta(\varphi) &= \varphi - 2\alpha \\
 y_Q(\varphi) &= 2f \cdot \operatorname{tg} \alpha \\
 z_Q(\varphi) &= y_Q^2 / 4f = f \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha \\
 y_P(\varphi) &= y_Q + (lf - z_Q) \operatorname{tg} \beta
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

Az elrendezés relativ torzítását a

$$\delta y = (y_P - y_P^{\operatorname{id}}) / y_P^{\operatorname{id}}
 \tag{3}$$

összefüggéssel értelmezzük, ahol y_P a (2) által, y_P^{id} pedig az (1) által adott függvény. δy a φ eltérítési szögön kívül nyilván a k, l paraméterektől is függ, azaz

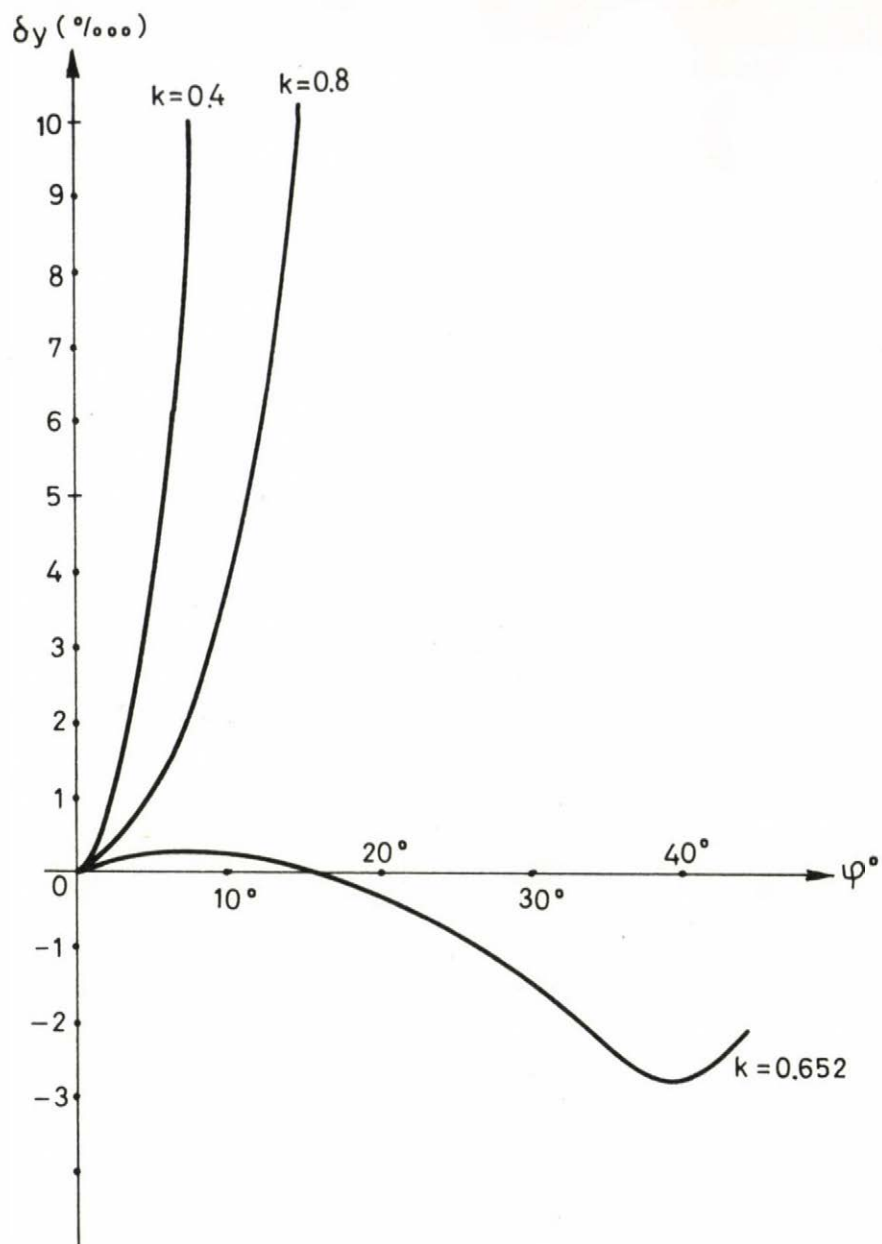
$$\delta y = \delta y(\varphi, k, l),$$

de - a geometriai hasonlóság miatt - független az f fókusz távolságtól. Ez indokolja a dimeziótlan k deflekciós paraméter és az l normált képtávolság bevezetését.

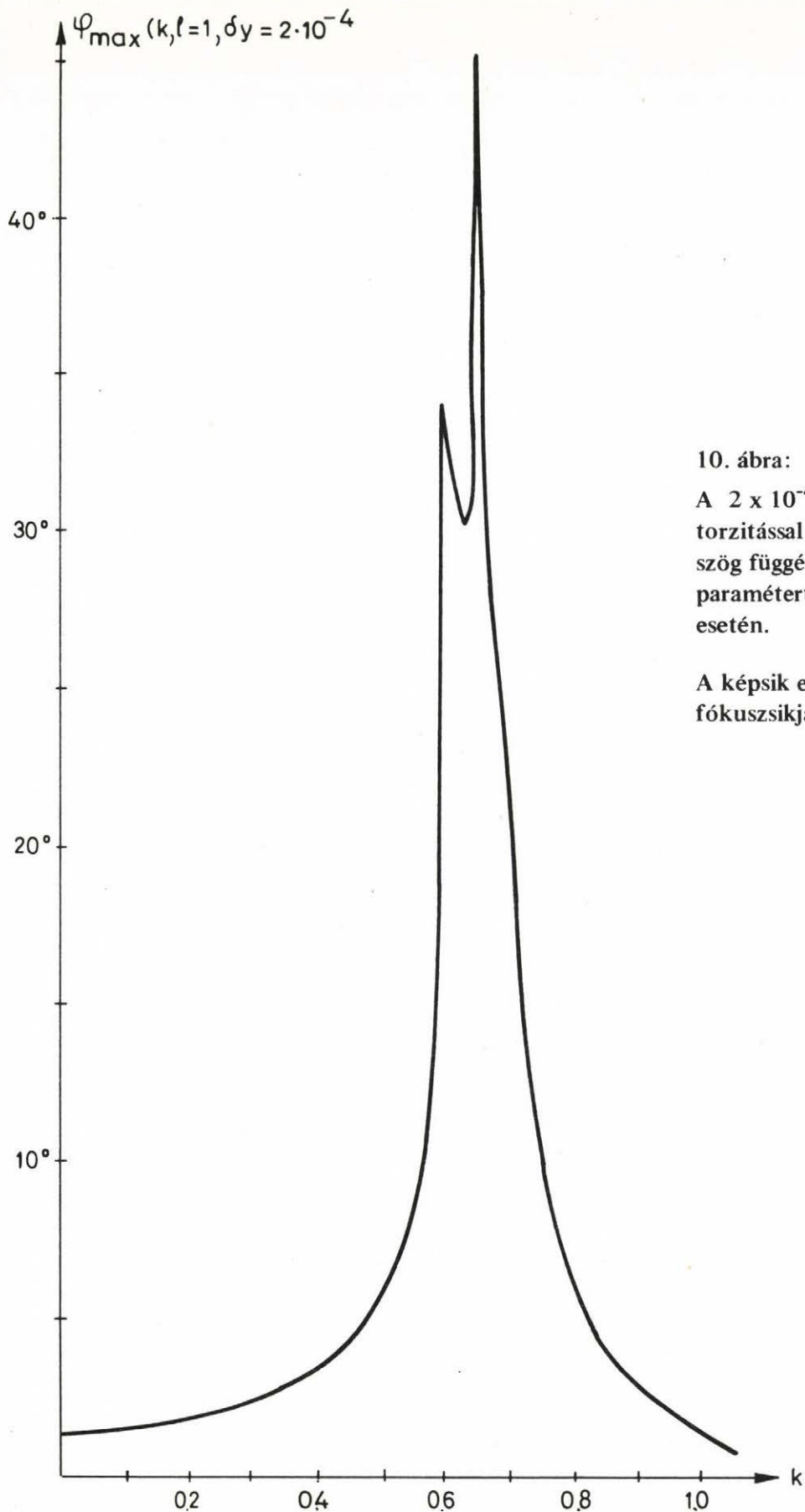
A $\delta y(\varphi)$ függvény viselkedését a 9. ábra illusztrálja, amelyen az $l=1$, és $k=0.4, 0.652, 0.8$ értékekhez tartozó görbék vannak feltüntetve. Látszik, hogy az optimális deflekciós paraméterhez tartozó torzítás még a 40° -kal eltérített nyaláb esetében sem éri el a 3×10^{-4} értéket, és 15° -ig még az 5×10^{-6} értéket sem (!).

Ez a néhány adat azt mutatja, hogy megfelelő deflekciós paraméter esetén a parabolatükör gyakorlatilag teljesen lineáris szkennelést biztosít.

Az optimális deflekciós paramétert úgy számítjuk ki, hogy (rögzített l -hez) meghatározzuk azt a k -t, amely a legnagyobb eltérítési szöget teszi lehetővé anélkül, hogy a relativ torzítás abszolút értéke egy fix értéknél nagyobbra nőne. Tehát rögzítjük a normált képtávolságot, l -et és a torzítás maximumát,



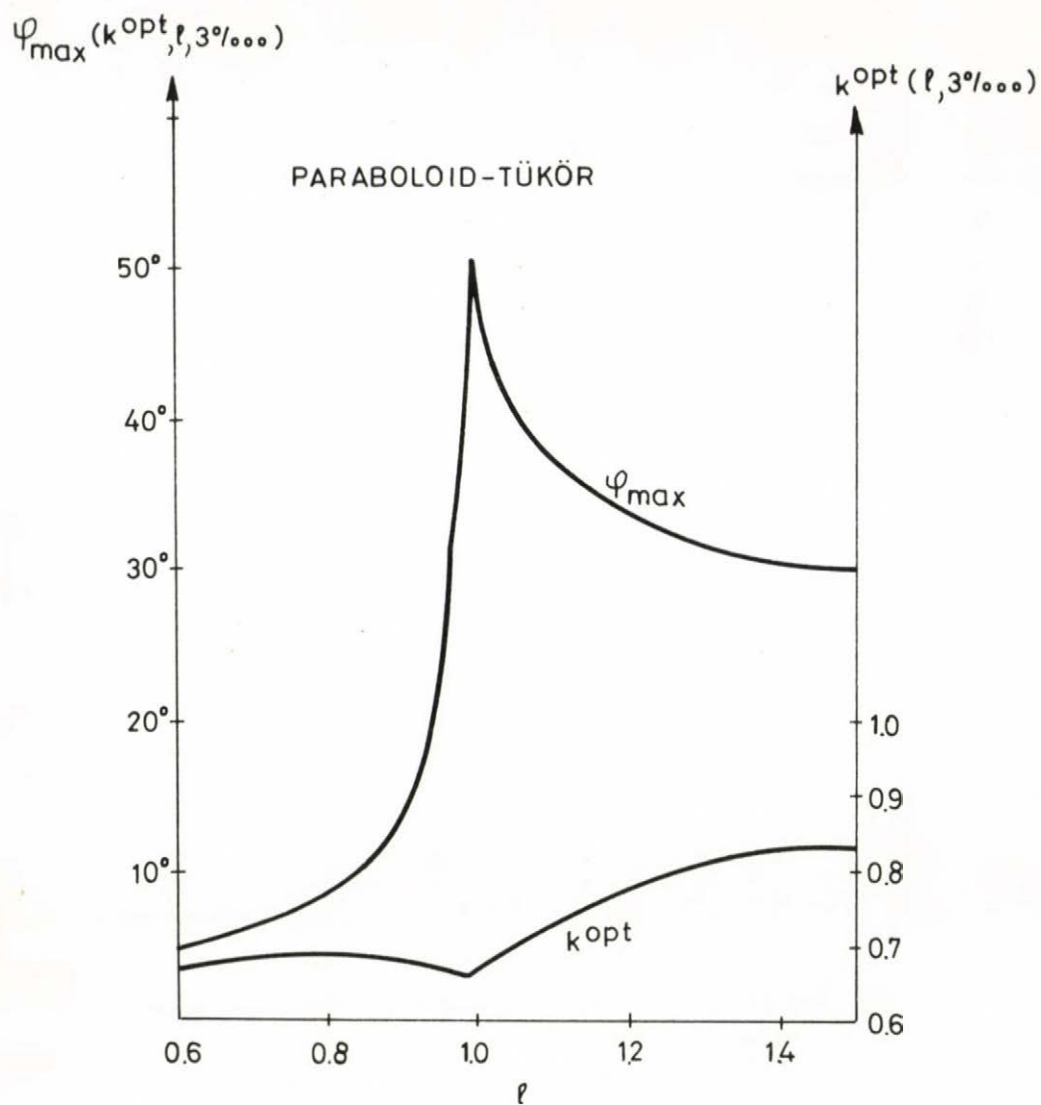
9. ábra: A parabolid-tükör relatív torzítása az eltérítési szög függvényében, ha a tükör fókusz távolsága a képtávolsággal azonos.
A deflektációs paraméter optimális értéke $k = 0.652$.



10. ábra:

A 2×10^{-4} -nél kisebb relatív torzitással elérhető eltérítési szög függése a deflektációs paramétertől parabolatükör esetén.

A képsík egybeesik a tükör fókusz síkjával.



11. ábra: Az optimális deflektációs paraméter függése a normált képtávolságtól;
a maximális eltérítési szög függése a képtávolságtól.

(A maximális, megengedett torzítás 3×10^{-4})

δy_{\max} -ot, majd meghatározzuk a

$$\varphi_{\max}(k; l, \delta y_{\max}) = \max\{\varphi \mid |\delta y(\varphi; k, l)| \leq \delta y_{\max}\}$$

függvényt. (Ennek a függvénynek a menetét az $l=1$ és $\delta y_{\max}=0.02\%$ esetre a 10. ábra mutatja.) Ezután megkeressük a $\varphi_{\max}(k, l, \delta y_{\max})$ függvénynek a k szerinti maximumát, ami pontosan a keresett k^{opt} defleksiós paramétert adja.

Érdemes megjegyezni, hogy a végeredmény gyakorlatilag nem függ a δy_{\max} értéktől.

A számítások végeredményét a 11. ábrán foglaltuk össze, ahol az optimális defleksiós paraméter és a vele elérhető maximális eltérítési szög látható a normált képtávolság függvényében.

2.2.2 A leképezés pontszerűségének a vizsgálata

Miután megállapítottuk, hogy a parabolatükör jól korrigálja a torzitást, még arról is meg kell győződnünk, hogy a képfolt mérete is megfelelő. Ehhez a rendszer képalkotási hibáit kell kiértékelni, ami még a legegyszerűbb, valamelyest is megbízható módszerek alkalmazása esetén is elég sok numerikus számítást igényel, és az eredmények sem áttekinthetőek. Ezért a leképezés pontszerűségével kapcsolatos kérdéseket nem vizsgáljuk olyan általánosságban, mint a torzításmentességet, és a továbbiakban néhány konkrét elrendezés hibáinak a kiértékelésére szorítkozunk.

Egy olyan rendszer méretezését tűzzük ki célul, amely

488 nm-es hullámhossz és

300 mm-es teljes sorhosszuság esetén

3000 pont felbontását

teszi lehetővé. Ez azt jelenti, hogy rögzített hullámhossz, diffrakciós foltátmérő és képmagasság mellett, a torzítás szempontjából optimális defleksiós paraméter esetén a tükör fókusztávolságát és a képtávolságot határozzuk meg. Ebből a célból kiszámítjuk a különböző eltérítési szögekhez tartozó

képmagasságot (pozíciót),
torzitást (pozicionálási hibát)
geometriai foltátmérőt,
asztigmatizmust (a tangenciális és szaggitális fókuszvonalak
távolságát, ill. az asztigmatizmusból fakadó
hullámfront-aberráció nagyságát) és a
defókuszáltságot (az "átlagos fókuszpont" távolságát a képsik-
tól).

Ezekből a teljesítménygörbékől megállapíthatjuk az adott kép-
magassághoz szükséges eltérítési szöget, a hozzátartozó torzi-
tást és a geometriai foltméretet. Ha az utóbbi a diffrakciós
foltméretnél jóval kisebb, akkor a leképezés várhatóan diffrak-
ció-limitált lesz.

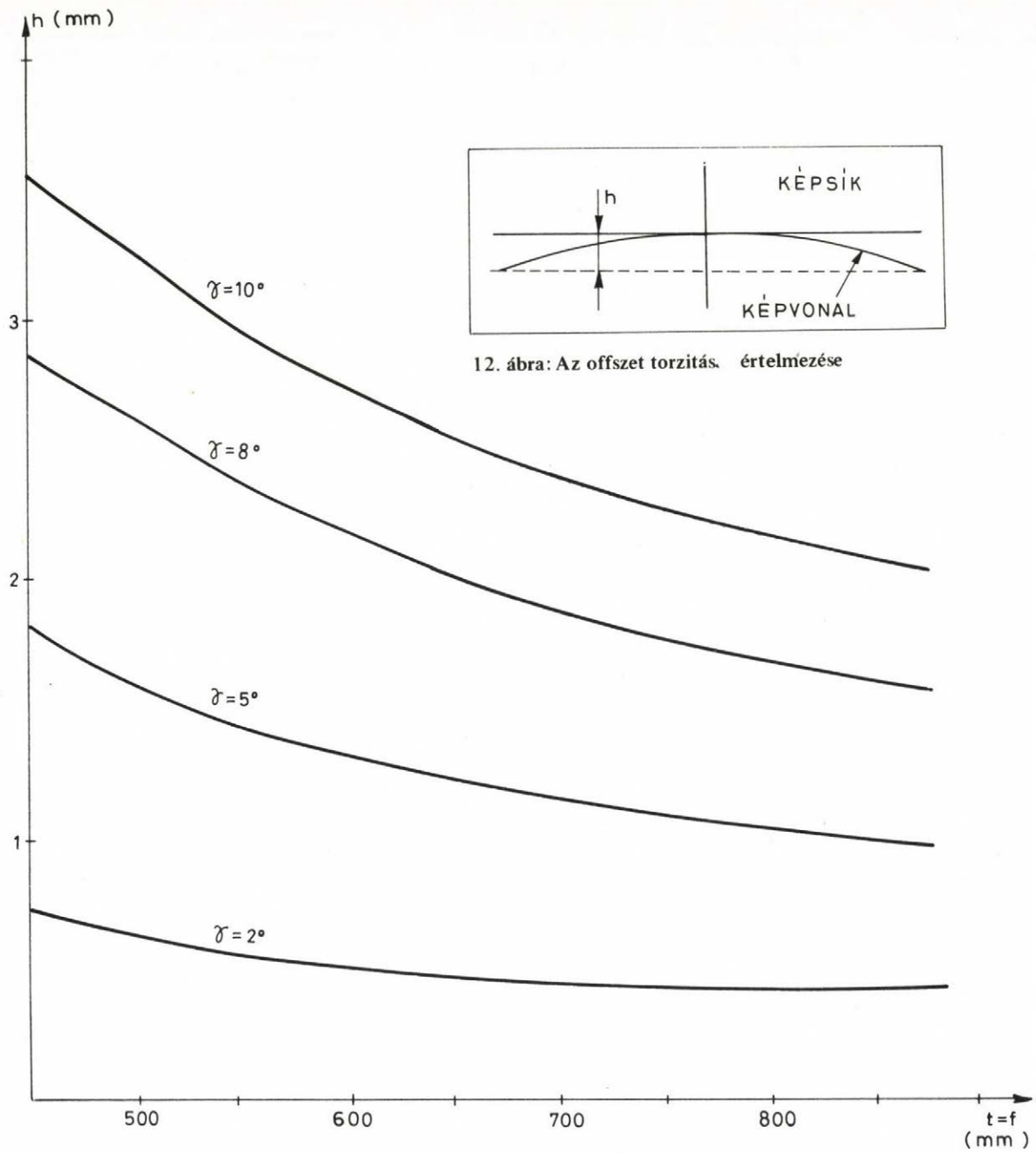
A 150 mm-es képmagasságon kívül azért tüntettük fel a 300
mm-es képmagassághoz tartozó szöget is, mert a következő pont-
ban leírt "offset torzitás" miatt célszerűbbnek látszik egy
olyan síkbeli elrendezés, amelyben a tükörnek csak az egyik fe-
lét használjuk ki, és ekkor nyilván ezen az oldalon kell elér-
ni a teljes sorhosszuságot.

A 150 mm-es képmagassággal működő elrendezések közül a *-
gal jelöltek várhatóan diffrakció-limitált teljesítményt nyuj-
tanak, és a torzitásuk is kb. két rászterpont, azaz 200 μm a-
latt marad. (Az $f=500$ mm, $lf=500$ mm esetben a torzitás 4 μm a-
latt van!)

A 300 mm-es képmagasságu tükrök között diffrakció-limitál-
tat nem találunk, de a megjelölt esetekben itt is remélhető,
hogy elég nagy moduláció-átvitel valósítható meg. Ezeknél az
elrendezéseknél azonban (három kivétellel) már 5-20 rászterpont-
nyi pozicionálási hiba lép fel, ami a korrigálatlan szkenn-
er torzitásával azonos nagyságrendet jelent.

2.2.3 A síkbeli elrendezéstől való eltérés okozta offset torzitás

A paraboloid-tükrös szkenn-
er leírásának az elején láttuk,
hogy a nyaláb ki- és belépésének a biztosításához a szkennelés



12. ábra: Az offset torzítás. értelmezése

13. ábra: Az offset torzítás függése a képtávolságtól 280 mm/es sorhosszúság esetén, különböző "offset szögekre". (Parabolid-tükör)

4. táblázat

A RÉSZLETESEN KIÉRTÉKELT PARABOLATÜKRÖK

Hullámhossz 488 mm

Foltátmérő 100 μm

Képtáv.	Fókusz	Defl. szög		Előfókusz	Nyalábátm.	Defl.param.
lf	f	150 mm	300mm	R_{Sc}	D	k
(mm)	(mm)	magassághoz		(mm)	(mm)	
		(fok)				
500	400	21	41	-1682.4	2.61	0.794
500	500	18	35	∞	3.11	0.652 *
500	600	16	31	3394.8	3.52	0.658 *
500	700	14	28	2213.4	3.93	0.662 *
500	800	13	25	1861.3	4.34	0.660 *
500	900	11	23	1731.3	4.78	0.674
500	1000	10	21	1674.0	5.20	0.674 *
1000	800	10	21	-3364.8	5.23	0.794 *
1000	1000	9	18	∞	6.21	0.652 *
1000	1200	8	16	6789.6	7.03	0.658 *
1000	1400	7	14	4426.8	7.86	0.662 *
1000	1600	6	13	3722.7	8.67	0.660 *
1000	1800	6	12	3463.2	9.56	0.674 *
1000	2000	5	11	3348.0	10.40	0.674 *

sikját "szét kell nyitni" (7. ábra).

Ennek a szétnyitásnak a következtében az eltérített nyaláb a képsíkon egyenes szakasz helyett görbeívet ír le (12. ábra). A görbe legalacsonyabban és legmagasabban levő pontjai között - függőleges irányban - mért távolságot offszet torzításnak nevezzük. Nagyságát az eltérített nyalábok fősugarainak az átvézetésével határozhatjuk meg. A különböző γ offszet szögekhez tartozó torzításnak a képtávolságtól való függését 150 mm-es képmagasság esetén a 13. ábra mutatja.

Mivel az 5° -nál kisebb offszet szög gyakorlatilag elérhetetlennek látszik, megállapíthatjuk, hogy az offszet torzítás milliméteres nagyságrendű, ami elfogadhatatlanul nagy.

2.3 A GÖMB-TÜKÖR

Miután a paraboloid-tükör előnyös tulajdonságaival megismerkedtünk, természetesen felmerül a kérdés, hogy egy azonos fókusz-távolságu, könnyebben elkészíthető gömbtükör nem oldja-e meg a feladatot. A számításokat elvégezve azt találjuk, hogy a gömbtükör bizonyos szempontból még alkalmasabb a szkennerek korrigálására.

Mivel a gondolatmenet teljesen azonos az előző pontban leírttal, csak az eredményeket foglaljuk össze. A jelöléseket illetően ismét a 7. és 8. ábrára hivatkozunk.

2.3.1 A minimális torzítást adó deflektációs paraméter meghatározása

Kis eltérítési szögekre a képmagasság most is

$$(1) \quad y_p^{id}(\varphi) = f[\ell(1-k)+k]\varphi$$

szerint függ az eltérítési szögtől.

Véges eltérítési szögekre az előző pont (2) képletei helyett azt kapjuk, hogy

$$(2) \quad y_P(\varphi) = f\{(\ell + \cos\alpha - 2) \cdot \operatorname{tg}\beta + 2\sin\alpha\},$$

ahol

$$\alpha = \varphi - \vartheta$$

$$\beta = 2\vartheta - \varphi$$

$$\vartheta = \arcsin \{(1 - k/2)\sin\varphi\}.$$

A relativ torzitást ismét a

$$(3) \quad \delta y = (y_P - y_P^{\text{id}}) / y_P^{\text{id}}$$

formula értelmezi.

Az $\ell=1$; $k=0.4, 0.5, 0.8$ értékekhez tartozó $\delta y(\varphi)$ görbék a 14. ábra mutatja. (Ez a 9. ábra megfelelője).

A rögzített $\ell=1$, $\delta y_{\max}=0.02\%$ esetre számított maximális eltérítési szögnek a k deflekciós paramétertől való függése a 15. ábrán látható. (Ez a 10. ábra megfelelője.)

Az optimális deflekciós paraméternek és a hozzátartozó maximális deflekciós szögnek a normált képtávolságtól való függése a 16. ábra két görbájén látható. (Ez a 11. ábra megfelelője.)

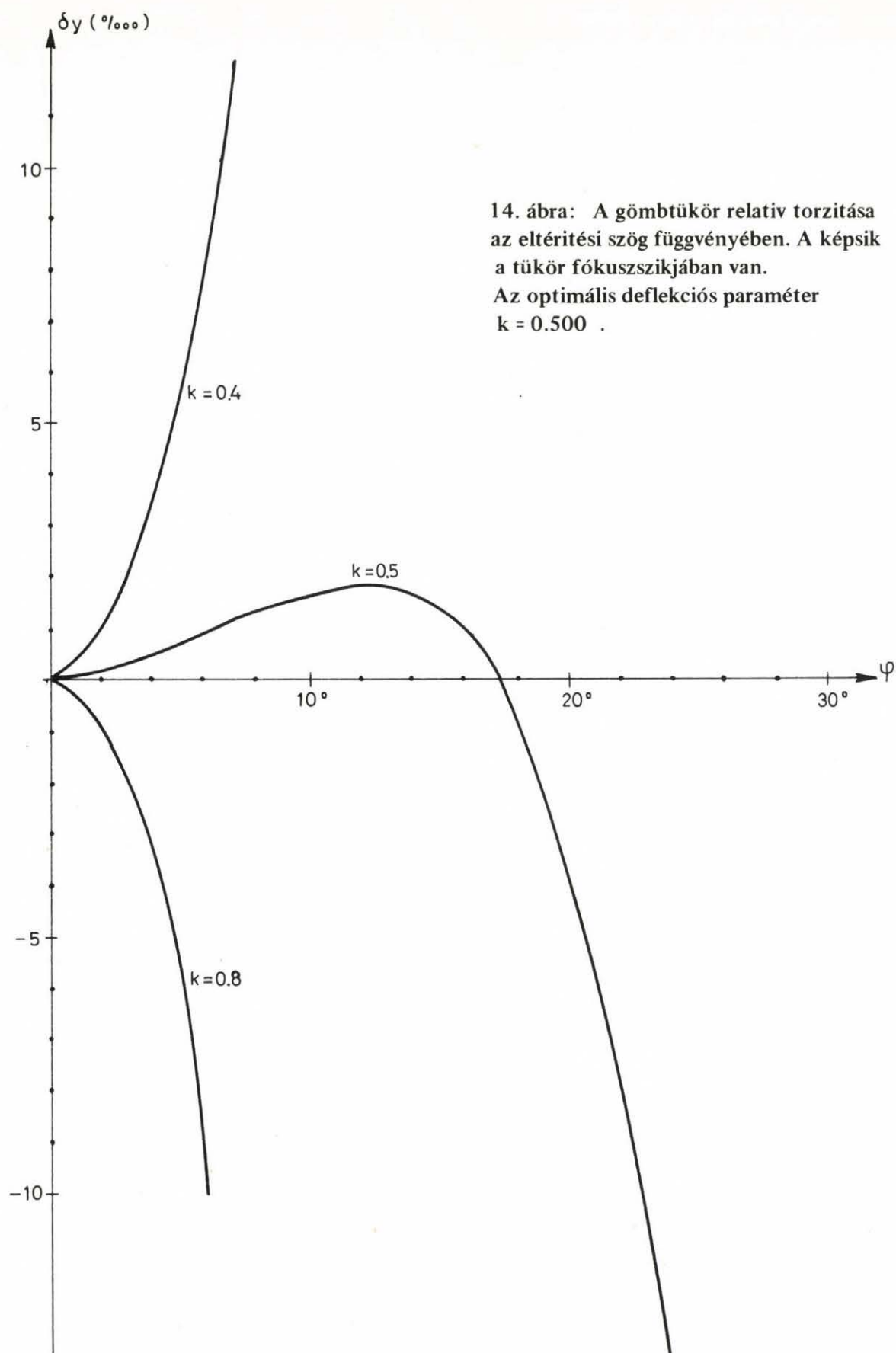
2.3.2 A leképezés pontszerűsége; a numerikus eredmények összefoglalása

Ismét a 488 nm-es hullámhossz és 100 μm -es diffrakciós foltátmérő esetét vizsgáljuk meg részletesen. A teljesítménygörbék adatait illetve az eredmények összefoglalását pedig az 5. táblázat tartalmazza.

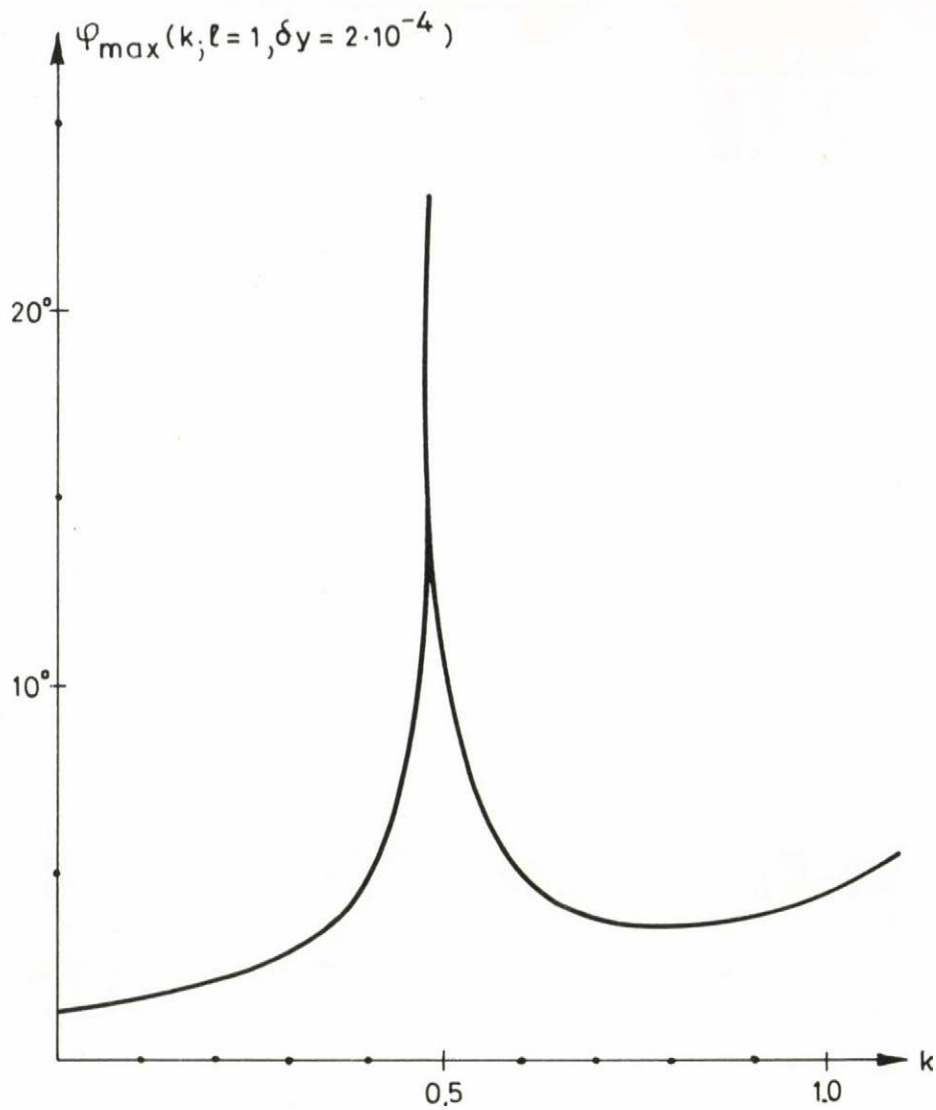
A *-gal jelölt elrendezések 150 mm-es képmagasságig diffrakció-limitált képet adnak, és a torzitásuk is egy raszterpont alatt (100 μm) marad.

A **-gal jelölt tükrökre ugyanez igaz 300 mm-es képmagasság esetén is.

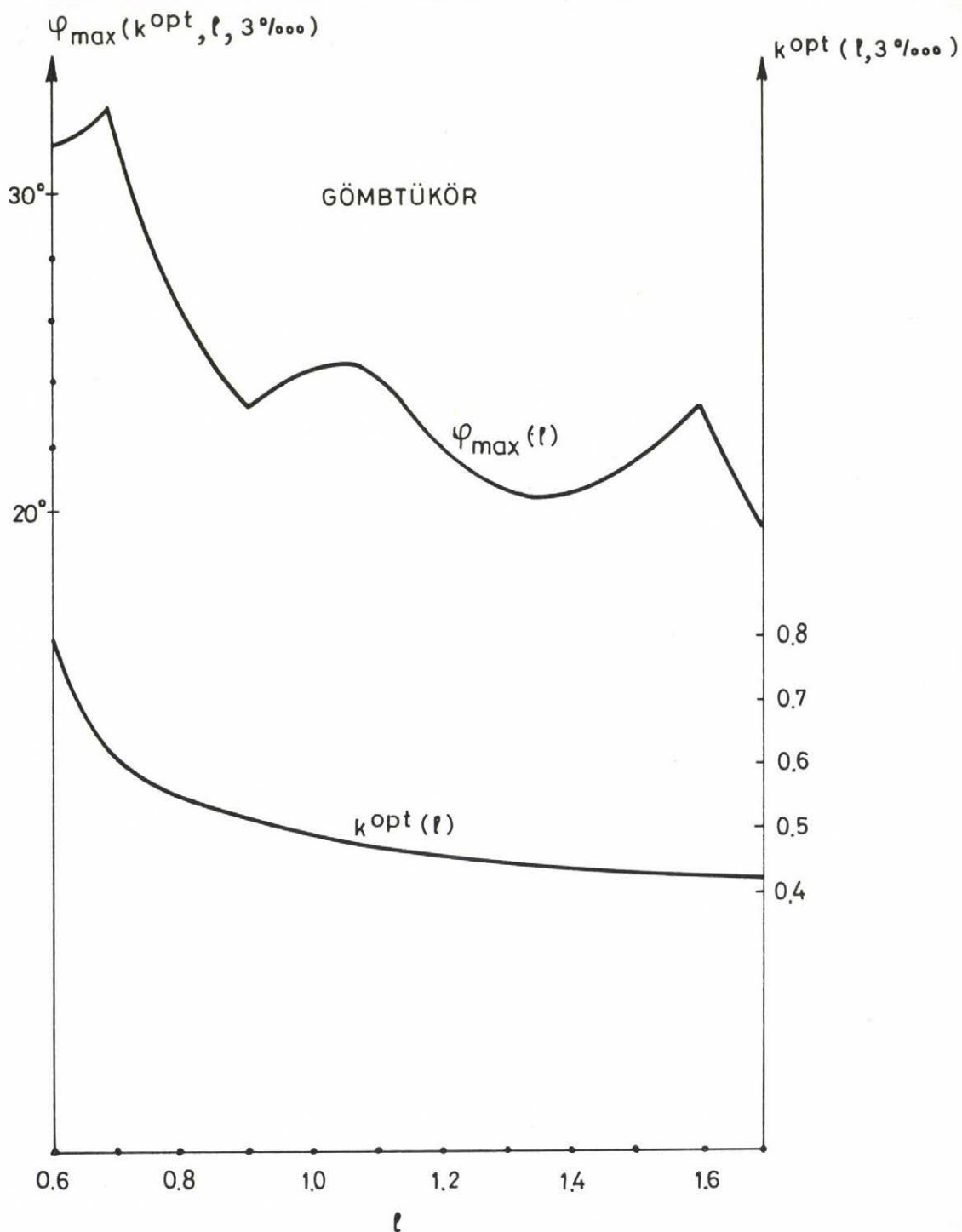
A fentiek alapján megállapíthatjuk, hogy a gömbtükrrel való korrekció még a parabolatükrösnél is jobbnak ígérkezik, hiszen már a geometriai optikai eredmények is meggyőzően jó minő-



14. ábra: A gömbtükör relatív torzitása az eltérítési szög függvényében. A képsík a tükör fókuszszíkjában van. Az optimális deflektációs paraméter $k = 0.500$.



15. ábra: A 2×10^{-4} -nél kisebb relatív torzitással elérhető eltérítési szög a deflektációs paraméter függvényében, gömbtükör esetén. A tükör fókuszsisíkja egybeesik a képsíkkal.



16. ábra: Az optimális deflektációs paraméter a normált képtávolság függvényében;
a 3×10^{-4} -nél kisebb torzitással, optimális deflektációs paraméter esetén
elérhető maximális eltérítési szög függése a normált képtáv.-tól.

5. táblázat

A RÉSZLETESEN KIÉRTÉKELT GÖMBTÜKRÖK

Hullámhossz 488 nm

Foltátmérő 100 μm

Képtáv.	Fókusz	Defl.szög		Előfókusz	Nyalábátm.	Defl.param.
lf	f	150 mm	300mm	R_{Sc}	D	k
(mm)	(mm)	magassághoz		(mm)	(mm)	
		(fok)				
500	400	19	39	-1816	2.82	0.460
500	500	17	35	∞	3.11	0.500 *
500	600	14	28	3660	3.79	1.100 *
500	700	14	28	2170	3.85	0.600 *
500	800	12	24	1899	4.43	0.708 *
500	900	11	21	1863	5.14	0.820 *
500	1000	10	19	1820	5.65	0.820 *
1000	800	10	19	-3632	5.64	0.460 *
1000	1000	9	17	∞	6.21	0.500 *
1000	1200	7	14	7320	7.58	1.100 *
1000	1400	7	14	4340	7.70	0.600 **
1000	1600	6	12	3799	8.85	0.708 **
1000	1800	5	10	3726	10.29	0.820 **
1000	2000	5	10	3640	11.31	0.820 **

ségű képalkotásra utalnak, és a pozicionálási hibák is kisebbek.

2.3.3 A gömbtükrös offszet torzítása

A parabolatükrös szkennerekhez hasonlóan az elrendezés szétnyitása a gömbtükrös esetében is görbült képvonalat eredményez.

Az offszet torzítás itt is milliméteres nagyságrendű, tehát megint a 300 mm-es képmagasságu, "félkaru" elrendezések közül kell választani.

A TANULMÁNSOROZATBAN 1981-BEN MEGJELENTEK:

- 116/1981 Sieglér András: Egy 6 szabadságfokú antropomorf manipulátor kinematikája számítógépes vezérlése
- 117/1981 Knuth Előd – Radó Péter: Principles of Computer Aided System Description
- 118/1981 Demetrovics János – Gyepesi György: Általános függőségek és lekérdezéssel kapcsolatos algoritmusok relációs adatmodellekben
- 119/1981 Sztanó Tamás: REAL-TIME programrendszerek eseményvezérelt szervezése
- 120/1981 Szentgyörgyi Zsuzsa: A számítástechnika műszaki fejlődése és társadalmi hatásai
- 121/1981 Vicsek Tamásné (Strehó Mária) : Vizsgálatok a kezdeti érték problémák numerikus megoldásával kapcsolatban
- 122/1981 Andó Györgyi – Lipcsey Zsolt: Sztochasztikus Ljapunov módszerek és alkalmazásai
- 123/1981 Márkus Zsuzsanna: Intelligens interaktív rendszerek elvi problémái
- 124/1981 Márkus Zsuzsanna: Logikai alapú programozási módszerek és alkalmazásai számítógéppel segített építészeti tervezési feladatok megoldásához
- 125/1981 Fabók Julianna: Software implementációs nyelvek
- 126/1981 Várszegi Sándor: Multimikroszámítógépes-rendszerek
- 127/1981 Lipcsey Zsolt: N-személyes minőségi differenciáljátékok késleltetéssel és késleltetés nélkül
- 128/1981 Böszörményi László: Multa-task rendszerek fejlesztése magasszintű nyelven
- 129/1981 Tóth János: A formális reakciókinetika globális determinisztikus és sztochasztikus modelljéről és néhány alkalmazásáról



